

TUGAS AKHIR - TM 091585

STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN MELALUI BACKWARD FACING STEP DENGAN PENAMBAHAN STAGGER RECTANGULAR BUMP PADA SISI UPSTREAM

FERDY
NRP. 2113 106 018

Dosen Pembimbing
Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2017



TUGAS AKHIR - TM 091585

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN
MELALUI *BACKWARD FACING STEP* DENGAN
PENAMBAHAN *STAGGER RECTANGULAR BUMP* PADA
SISI UPSTREAM**

FERDY
NRP. 2113 106 018

Dosen Pembimbing
Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2017



FINAL PROJECT - TM 091585

**NUMERICAL STUDY OF FLOW CHARACTERISTIC
THROUGH BACKWARD FACING STEP WITH ADDITIONAL
STAGGER RECTANGULAR BUMP
ON THE UPSTREAM SIDE**

**FERDY
NRP 2113 106 018**

**Counsellor
Dr.Wawan Aries Widodo, ST, MT.**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute Of Technology
Surabaya
2017**

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN
MELALUI BACKWARD FACING STEP DENGAN
PENAMBAHAN STAGGER RECTANGULAR BUMP
PADA SISI UPSTREAM**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Ferdy

NRP. 2113106018

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT (Pembimbing)
NIP. 197104051997021001
2. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA (Penguji I)
NIP. 196001291897011001
3. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng. PhD. (Penguji II)
NIP. 196412281990031002
4. Vivien Suphandani, ST, M.Eng. PhD. (Penguji III)
NIP. 197804012002121001



SURABAYA

JULI, 2017

STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN MELALUI BACKWARD FACING STEP DENGAN PENAMBAHAN STAGGERED RECTANGULAR BUMP PADA SISI UPSTREAM

Nama Mahasiswa : Ferdy
NRP : 2113 106 018
Jurusan : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Dr. Wawan Aries Widodo, ST,MT.

Abstrak

Dalam sistem ducting terdapat banyak penggunaan saluran Backward facing step yang mana akan menyebabkan terjadinya kerugian tekanan pada aliran. Hal tersebut disebabkan karena perubahan arah aliran fluida pada *step downstream* yang melalui saluran tersebut. Nilai penurunan tekanan (*pressure drop*) pada aliran yang melalui saluran tersebut dipengaruhi oleh besarnya laju aliran pada inlet, serta ukuran *step* antara *upstream* dan *downstream*, yang menyebabkan terjadinya separasi dan aliran sekunder (*secondary flow*) pada *downstream*. Hal ini menyebabkan kerugian energi aliran (*headloss*), sehingga perlu dilakukan usaha meminimalisasi *pressure drop* yang terjadi di dalam saluran *backward facing step*.

Model uji yang akan digunakan di dalam studi ini berupa saluran *backward facing step* yang dipasang bodi pengganggu pada sisi *upstream*. Fluida yang mengalir adalah udara pada suhu ruangan yang *incompressible*, *viscous*, *steady* dan mempunyai profil kecepatan uniform pada sisi inlet sebesar 44.2 m/s. nilai Reynolds yang digunakan 3.8×10^4 dengan variasi jarak pengganggu berupa *rectangular bump* yang disusun *staggered* pada sisi *upstream* ($s = 0.25h, 0.35h, 0.4h$). Penelitian dilakukan

secara numerik 3D menggunakan piranti lunak *Computation Fluid Dynamics* (CFD) komersial dengan model turbulensi $k-\epsilon$ *Reliazable*.

Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah dengan penambahan bodi pengganggu pada sisi *upstream* berupa *rectangular bump* yang disusun *stagger* pada sisi *upstream* ($s=0.25h, 0.35h, 0.4h$) dapat mengurangi jarak titik *reattachment* pada aliran yang mengalir pada area yang mengalami perluasan penampang. Variasi jarak bump $s=0.25h$ pada posisi $z=0.0508$ memperlihatkan hasil yang lebih baik dengan jarak titik *reattachment* yang paling pendek dari pada variasi jarak bodi pengganggu yang lain. Pengurangan panjang *reattachment* sekitar lebih dari 10 % dari benda uji tanpa menggunakan *bump*. Penambahan bodi pengganggu dapat mengurangi *pressure drop* yang terjadi pada pemodelan benda uji.

Kata kunci : *Backward facing step, bump, pressure drop, headloss, flow separation, adverse pressure gradient, CFD.*

Numerical Study Of Flow Characteristic Through Backward Facing Step With Additional Stagger Rectangular Bump On The Upstream Side

Name :Ferdy
NRP :2113 106 018
Department :Teknik Mesin FTI – ITS
Counsellor :Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT.

Abstract

In the ducting system there are many uses of backward facing step. Backward facing step will cause pressure loss on the flow. This is due to separation or back flow on downstream through the pipe. Pressure drop the pipe is influenced by comparison of inlet and outlet pipe diameter. Separation of flow can cause vortex. It will cause loss of energy. It is necessary to minimize the pressure drop.in the backward facing step.

Model researched in this study is backward facing step expansion channel with the addition of an disturbance body on the upstream. The fluid used is incompressible flow, viscous, steady, uniform velocity profile at the inlet side, used reynold number 3.8×10^4 with the variation of disturbance (circular bump) distance from the step on the upstream side ($s= 0.25h, 0.35h, 0.4h$). 3D numerical simulation was conducted by using Computation Fluid Dynamic (CFD) software with $k-\varepsilon$ realizable turbulence model and discretization type use second order.

The study concludes that the addition of disturbance body on the upstream side as a circular bump with distance variations of $s= s= 0.25h, 0.35h, 0.4h$ will decrease reattachment point distance of the flowing fluid in the expanded area of the channel. The bump's distance $s= 0.25h$ on the Z surface area yields the best result because it is the shortest then the other distance value, and decreases reattachment length more than that 10% lower then the reattachment length of model without bump. The addition of disturbance body decreases pressure drop which is occurred in the simulation

Key words : backward facing step, $k-\varepsilon$ Realizable, pressure drop, secondary flow

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur hanya milik Allah SWT, Tuhan penguasa alam, yang selalu melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan tugas akhir. Dalam penulisan tugas akhir ini tidak semata-mata karena kemampuan penyusun, melainkan karena adanya bantuan dari berbagai pihak yang telah memberikan dorongan moral, pikiran dan tenaga untuk membantu penyusunan tugas akhir ini sehingga dapat terselesaikan dengan baik. Untuk itu pada kesempatan ini saya ucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak, Ibu tercinta (Sofian dan Erna) yang telah memberikan dorongan dan semangat dengan cinta dan kasih sayangnya yang tiada batas dan tak terbalaskan, serta doa restunya.
2. Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT. selaku dosen pembimbing yang telah menyumbangkan waktu, tenaga, serta pikirannya sehingga tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.
3. Bapak Bambang Pramujati, ST., MT., PhD. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.
4. Bapak dan ibu dosen penguji tugas akhir yang telah memberikan kritik dan saran demi kesempurnaan tugas akhir ini.
5. Semua Bapak dan Ibu dosen Teknik Mesin yang telah memberikan ilmu selama kuliah. Juga untuk seluruh karyawan Teknik Mesin atas pelayanannya.
6. Khoirul Budiyanto Selaku patner tugas akhir. Juga seluruh angkatan 2013 Lintas Jalur atas canda dan tawanya selama kuliah dan teman seperjuangan selama asistensi.

7. Seluruh warga Mesin ITS serta berbagai pihak yang belum tertulis dan yang tidak mungkin disebutkan satu persatu yang telah berperan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.

Akhir kata semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua. Penulisan tugas akhir ini masih banyak kekurangan, oleh karena itulah segala kritik dan saran sangat kami harapkan.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan.....	ii
Abstrak	iii
<i>Abstract</i>	v
Kata Pengantar	vii
Daftar Isi.....	ix
Daftar Gambar.....	xi
Daftar Tabel.....	xvii
 BAB I PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	 7
2.1 Aliran didalam <i>Backward Facing Step</i>	7
2.1.1 Mekanisme Terjadinya Separasi Aliran	7
2.2 Fenomena Lapis Batas (Boundary Layer)	9
2.3 Bilangan <i>Reynolds</i>	12
2.3.1 Aliran Laminer	13
2.3.2 Aliran Turbulen	13
2.4 <i>Coefficient pressure</i> (C_p)	14
2.5 Karakteristik Aliran pada <i>Backward Facing Step</i>	14
2.6 Model Turbulen	27
2.6.1 <i>Spalart-Alamaras</i>	27
2.6.2 <i>Model K- ϵ</i>	27
2.6.3 <i>Model k-ω</i>	28
2.6.4 <i>Reynolds Stress Number</i>	29
2.7 Kondisi Batas.....	29
2.7.1 <i>Flow Inlet dan Exit Boundaries</i>	29

2.7.2	<i>Wall, Repeating, dan Pole Boundaries</i>	31
2.7.3	<i>Internal Cell Zones</i>	32
2.7.4	<i>Internal Face Boundaries</i>	33
BAB III METODE PENELITIAN		35
3.1	Geometri <i>backward facing step</i>	35
3.2	Metode Numerik.....	36
3.3.1	<i>Tahap Pre-Processing</i>	36
3.3.2	<i>Tahap Post Processing</i>	41
BAB IV DATA DAN ANALISA HASIL PENELITIAN		47
4.1	Analisa Aliran Backward Facing Step Tanpa Rectangular Bump	47
4.2	Analisa Aliran Backward Facing Step Tanpa Dan Dengan Penambahan Bump	52
4.2.1	Panjang Reattachment	52
4.2.2	Distribusi Profil Kecepatan	46
4.2.3	Distribusi IntensitasTurbulensi.....	68
4.2.4	<i>Coefficient of pressure (Cp)</i>	71
4.2.5	<i>Coefficient friction (Cf)</i>	74
BAB V PENUTUP.....		79
5.1	Kesimpulan.....	79
5.2	Saran	80
DAFTAR PUSTAKA.....		xix

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Karakteristik aliran didalam <i>backward facing step</i>	.7
Gambar 2.2	<i>Boundary Layer</i> pada silinder.....	11
Gambar 2.3	Grafik C_p terhadap x/h untuk perbedaan model turbulen dan <i>near-wall treatment</i> $\alpha=0^\circ$, $Re=38000$	15
Gambar 2.4	Perbandingan distribusi kecepatan pada sudut aliran <i>backward facing step</i> yang diprediksi dengan model turbulen yang berbeda $\alpha=0^\circ$, $Re= 38000$ (Kim dkk, 2005).....	16
Gambar 2.5	Perbandingan C_p dan C_f untuk model turbulen dan near wall treatment yang berbeda (Kim dkk, 2005)	18
Gambar 2.6	Skema Geometri eksperimental dari aliran <i>backward facing step</i> (Lee dan Matesscu, 1998).....	19
Gambar 2.7	Aliran pada ekspansi rasio 1.9423 dengan variasi number ; a). $Re = 0.0001$; b). $Re= 0.1$; c). $Re = 1$; d). $Re = 10$; e). $Re = 50$; f). $Re= 100$ (G. Biswas dan Breuer, 2004)	20
Gambar 2.8	Aliran pada ekspansi rasio 1.9423 dengan variasi number ; a). $Re = 0.0001$; b). $Re= 200$; c). $Re = 400$; d). $Re = 600$; e). $Re = 800$; f). $Re= 100$ (G. Biswas dan Breuer, 2004)	20

Gambar 2.9 Grafik jarak utama <i>recirculation</i> pada <i>backward facing step</i> (x/h) untuk perbedaan ekspansi $H/h = 1.9423, 2.5, 3.0$ (G. Biswas dan Breuer, 2004).....	21
Gambar 2.10 Geometri <i>backward facing step</i> dengan kondisi inlet (Driver dan Seegmiller,1985)	22
Gambar 2.11 Lokasi titik reattachmet terhadap perubahan sudut dinding atas (Driver dan Seegmiller,1985).....	24
Gambar 2.12 Distribusi <i>static preasure</i> C_p pada daerah obstacle pada bilangan Reynolds (a) $Re = 1.3 \times 10^4$; (b) $Re = 2.1 \times 10^4$ (Sutardi dan widodo, 2008)....	25
Gambar 2.13 Profil kecepatan (u/U) pada berbagai posisi (a) $x/w = -3$; (b) $x/w = 0.5$; dan (c) $x/w = 3$ pada bilangan Reynolds 1.3×10^4 (Sutardi dan widodo, 2008)	26
Gambar 3.1 Geometri penampang <i>backward facing step</i>	36
Gambar 3.2 Variasi jarak bodi pengganggu staggered	37
Gambar 3.3 (a) Meshing benda uji tanpa bump, (b) Meshing pada daerah bump, (c) Meshing pada benda uji <i>backward facing step</i>	39
Gambar 3.4 (a) Domain simulasi dan kondisi batasnya, (b) Posisipengambilan data C_p , C_f , dan profil kecepatan pada $Z=0$, $Z=0.0254$ dan $Z=0.0508$	40
Gambar 3.5 Grafik Grid Independency	45

Gambar 4.1	Visualisasi kontur kecepatan pada saluran <i>backward facing step</i>	48
Gambar 4.2	Titik <i>Reattachment</i>	49
Gambar 4.3	Visualisasi kontur tekanan statis.....	49
Gambar 4.4	Grafik <i>coefficient pressure</i> (C_p) pemodelan tanpa <i>bump</i>	50
Gambar 4.5	Grafik <i>coefficient friction</i> (C_f) pemodelan tanpa <i>bump</i>	51
Gambar 4.6	<i>Resirkulasi</i> aliran tanpa menggunakan <i>bump</i> dan dengan variasi jarak <i>bump</i> pada posisi $Z = 0$	53
Gambar 4.7	<i>Resirkulasi</i> aliran tanpa menggunakan <i>bump</i> dan dengan variasi jarak <i>bump</i> pada posisi $Z = 0.0254$	55
Gambar 4.8	<i>Resirkulasi</i> aliran tanpa menggunakan <i>bump</i> dan dengan variasi jarak <i>bump</i> pada posisi $Z = 0.0508$	57
Gambar 4.9	Perbandingan profil kecepatan pada beberapa <i>cross section</i> x/h , model <i>backward facing step</i> tanpa ada penambahan <i>bump</i> pada posisi $z=0$	60
Gambar 4.10	Perbandingan profil kecepatan pada beberapa <i>cross section</i> x/h , model <i>backward facing step</i> tanpa ada penambahan <i>bump</i> pada posisi $z=0.0254$	61

Gambar 4.11	Perbandingan profil kecepatan pada beberapa <i>cross section</i> x/h , model <i>backward facing step</i> tanpa ada penambahan <i>bump</i> pada posisi $z=0.0508$	62
Gambar 4.12	Visualisasi kontur kecepatan model <i>backward facing step</i> dengan penambahan pengganggu <i>bump</i> pada posisi $Z=0$	64
Gambar 4.13	Visualisasi kontur kecepatan model <i>backward facing step</i> dengan penambahan pengganggu <i>bump</i> pada posisi $Z=0.0254$	65
Gambar 4.14	Visualisasi kontur kecepatan model <i>backward facing step</i> dengan penambahan pengganggu <i>bump</i> pada posisi $Z=0.0508$	66
Gambar 4.15	Visualisasi Aliran 3D kontur velocity magnitude.	67
Gambar 4.16	Visualisasi kontur intensitas turbulensi tanpa dan dengan penambahan pengganggu <i>bump</i>	70
Gambar 4.17	Perbandingan grafik C_p tanpa <i>bump</i> dan dengan menggunakan <i>bump</i> pada posisi $z=0$	72
Gambar 4.18	Perbandingan grafik C_p tanpa <i>bump</i> dan dengan menggunakan <i>bump</i> pada posisi $z=0.0254$	72
Gambar 4.19	Perbandingan grafik C_p tanpa <i>bump</i> dan dengan menggunakan <i>bump</i> pada posisi $z=0.0508$	73
Gambar 4.20	Perbandingan grafik C_f tanpa <i>bump</i> dan dengan menggunakan <i>bump</i> pada posisi $z=0$	74

Gambar 4.21 Perbandingan grafik Cf tanpa <i>bump</i> dan dengan menggunakan <i>bump</i> pada posisi $z=0.0254$	75
Gambar 4.22 Perbandingan grafik Cf tanpa <i>bump</i> dan dengan menggunakan <i>bump</i> pada posisi $z=0.0508$	76

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Panjang <i>Reattachment</i> (Kim dkk, 2005).....	17
Tabel 3.1 Monitoring Nilai Residual.....	43
Tabel 3.2 Hasil <i>grid independensi</i> benda uji tanpa <i>bump</i>	44
Tabel 4.1 Perbandingan Jarak <i>Reattachment</i> Pada Posisi $Z=0$	54
Tabel 4.2 Perbandingan Jarak <i>Reattachment</i> Pada Posisi $Z=0.0254$	56
Tabel 4.3 Perbandingan Jarak <i>Reattachment</i> Pada Posisi $Z=0.0508$	58
Tabel 4.4 Perbandingan nilai <i>pressure drop</i>	73
Tabel 5.5 Perbandingan jarak <i>reattachment</i> pada posisi $Z=0.0508$	79

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ilmu pengetahuan dan teknologi telah berkembang dengan pesat, dan hal ini mendorong manusia untuk memanfaatkan sebaik-baiknya ilmu pengetahuan tersebut. Salah satu usaha manusia dalam hal ini adalah kajian intensif dalam bidang mekanika fluida, diantaranya mendesain suatu konstruksi yang mengontrol perilaku fluida. Hal ini dimaksudkan agar diperoleh efisiensi kerja yang maksimal dan dapat mereduksi beberapa masalah yang ditimbulkan, akibat terjadinya separasi aliran misalnya *headloss*. Pada aliran di dalam pipa terutama di *sudden expansion*, separasi aliran terjadi didekat dengan sambungan antara pipa atau *fitting*. Separasi aliran ini menimbulkan *drag* sehingga terjadi penurunan tekanan.

Dalam penelitian ini, saluran *sudden expansion* dijadikan studi kasus dimana saluran *sudden expansion* adalah sebuah saluran ducting yang mengalami pembesaran penampang atau ekspansi pada bagian *downstream*, atau bisa juga disebut *backward facing step*. Pada aplikasinya dapat ditemukan pada heat exchanger, turbin, dan pipa gas buang pada kapal laut.

Fenomena aliran yang sangat kompleks terjadi pada pipa *backward facing step* dimana pada pipa *backward facing step* akan terjadi aliran atau *flow* yang mengalami separasi, resirkulasi, vorteks dan *reattachment*. Separasi aliran merupakan peristiwa dimana aliran fluida terpisah dari permukaan benda. Separasi aliran yang terjadi pada *backward facing step* diawali dengan adanya aliran fluida yang terus menerus mengalami tegangan gesek. Adanya gaya gesek menyebabkan momentum aliran berkurang sampai suatu saat momentum aliran sudah tidak bisa mengatasi hambatan sehingga aliran akan terpisah dari permukaan benda, mengakibatkan adanya aliran sekunder yang memblockage aliran utama yang mengakibatkan berkurangnya debit (*flow rate*) pada

aliran utama. Resirkulasi aliran dan vortex menyebabkan adanya aliran balik atau *back flow* yang mengganggu aliran utama. *Reattachment* merupakan bergabungnya kembali aliran utama setelah terjadi separasi.

Pada penelitian sebelumnya, **Kim dkk. (2005)** melakukan studi numerik dengan membandingkan metode *near wall treatment* pada model turbulen yang berbeda pada rasio ekspansi dan bilangan Reynolds yang sama dengan eksperimental yang dilakukan oleh **Driver** dan **Seegmiller** (1985), hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa model turbulensi didekat dinding (*near wall treatment*) *non equilibrium* yang disimulasikan dengan berbagai macam model turbulen (SKE, RNG, RKE, RSM, SKW, dan SST) menampilkan hasil yang bagus untuk memprediksi panjang *reattachment* dan *coefficient pressure*. **Kuehn** (1980) dalam penelitiannya mengukur panjang *reattachment* sebagai fungsi terhadap rasio ekspansi (Er). Dari hasil pengukuran dan penelitian sebelumnya yang dilakukan, ia menunjukkan bahwa *reattachment* akan bertambah panjang berbanding lurus dengan kenaikan rasio ekspansi hingga $Er = 1.7$. Titik *reattachment* merupakan salah satu parameter penting dalam aliran ini sehingga dilakukan pengukuran panjang *reattachment* terhadap perubahan bilangan Reynolds atau perubahan nilai Er . **Eaton** dan **Johnston** (1980) melakukan pengukuran panjang *reattachment* dengan merubah bilangan Reynolds. Hasil pengukuran menunjukkan meskipun menggunakan bilangan Reynolds yang tinggi, ternyata panjang *reattachment* tidak hanya dipengaruhi bilangan Reynolds saja namun juga dipengaruhi oleh ketebalan *boundary layer*.

Sutardi dan **widodo** (2008) menyatakan adanya obstacle pada aliran turbulen memberikan peningkatan *turbulence intensity* (Tu). Meningkatnya *turbulence intensity* diharapkan memberikan turbulen, sehingga aliran yang terseparasi pada *facing step* memiliki lokasi *reattachment* lebih pendek pada daerah *ddownstream*.

Berdasarkan penelitian – penelitian terdahulu maka muncul pemikiran untuk melakukan suatu kajian tentang struktur turbulensi *boundry layer* pada aliran *backward facing step* dengan pengaruh penambahan bodi pengganggu berupa *rectangular bump* yang disusun dengan *staggered configuration*. Sepengetahuan penulis, sampai saat ini belum pernah ada kajian tentang pengaruh penambahan *obstacle* pada aliran *backward facing step*.

1.2 Perumusan Masalah

Pembesaran penampang saluran *backward facing step* mengakibatkan terjadinya struktur turbulen pada daerah *shear layer* meningkat menyebabkan pembentukan resikulasi kecepatan rendah dan sehingga memberikan *preasure drop* pada daerah tersebut. Berdasarkan hasil eksperimental yang dilakukan oleh **Sutardi** dan **widodo** (2008) menyatakan adanya *obstacle* pada aliran turbulen memberikan peningkatan *turbulence intensity* (Tu). Meningkatnya *turbulence intensity* diharapkan memberikan pengaruh pada aliran setelah melewati *obstacle* menjadi lebih turbulen, sehingga aliran yang terseparasi pada *facing step* memiliki lokasi *reattachment* lebih pendek pada daerah *downstream*.

Dalam penelitian ini dilakukan simulasi dengan menambahkan bodi pengganggu (*bump*) pada sisi *upstream* berupa penambahan *rectangular bump* yang disusun secara *staggered* dengan variasi jarak $x/h = 0.25, 0.35, \text{ dan } 0.4$ akan meningkatkan intensitas turbulensi dari *shear layer* yang terseparasi dari *obstacle* di daerah *upstream* daripada *downstream*. Dengan perbandingan jarak tersebut diharapkan dapat mempengaruhi jarak *reattachment* pada aliran sehingga dapat mengurangi *losses* berupa *pressure drop* yang terjadi pada pipa *backward facing step*.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk menjelaskan fenomena yang terjadi dengan memvariasikan jarak bodi pengganggu yang disusun secara *stagger* pada *backward facing step*. Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Mengetahui *Pressure distribution coefficient* (C_p) dan *skin friction coefficient* (C_f) pada daerah *downstream* geometri *backward facing step*
- b. Mengetahui fenomena aliran pada daerah *downstream backward facing step* setelah ditempatkan *bump* dan sebelum ditempatkan *bump*.
- c. Mengetahui bentuk visualisasi kontur tekanan dan *turbulence intensity backward facing step*.
- d. Mengetahui data berupa grafik vektor kecepatan dan panjang *reattachment* di beberapa titik daerah *downstream backward facing step*.
- e. Mengevaluasi *pressure drop* terhadap variasi x/h

1.4 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini dapat diambil beberapa batasan masalah agar penelitian yang dilakukan lebih fokus. Adapun batasan masalahnya adalah sebagai berikut :

1. Fluida yang digunakan adalah udara yang bersifat *incompressible*, *viscous*, dan *steady*.
2. Profil kecepatan fluida pada sisi inlet dianggap *uniform*.
3. Penelitian dilakukan dengan menganggap tidak terjadi perpindahan panas akibat gesekan antara fluida dan dinding.
4. Dinding pada simulasi numerik *backward facing step* dianggap halus (*smooth wall*)
5. Pemodelan menggunakan simulasi numerik dengan perangkat lunak CFD komersial.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini antara lain :

1. Mampu mengetahui efek yang muncul dari penambahan *rectangular bump* yang disusun secara *staggered* terhadap panjang *reattachment* pada *backward facing step*.
2. Mampu mendapatkan data kuantitatif dan data kualitatif (visualisasi aliran), yaitu berupa :
 - Data kuantitatif antara lain berupa grafik distribusi koefisien tekanan(C_p), *skin friction coefficient* (C_f), jarak *reattachment* pada *downstream backward facing step*.
 - Data Kualitatif (visualisasi aliran) antara lain berupa kontur kecepatan, kontur tekanan dan *pathline* dari vektor kecepatan

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

BAB II

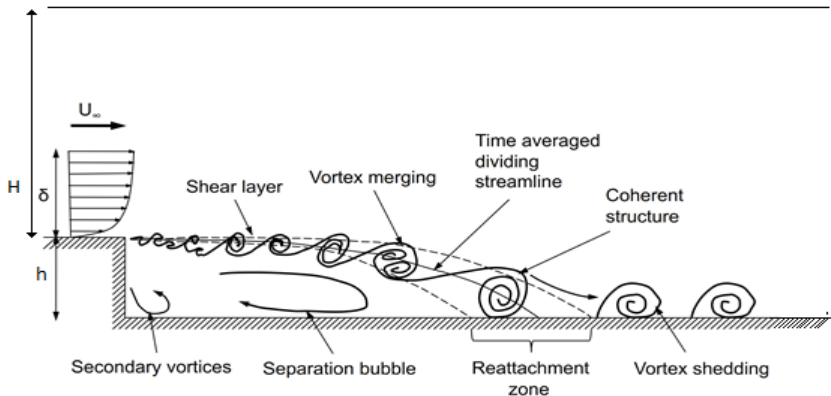
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Aliran didalam Backward Facing Step

Perubahan luas penampang pada pipa *backward facing step* mengakibatkan terjadinya *losses* berupa separasi dan *vortex* atau *secondary flow* yang akan berpengaruh terhadap tekanan, dan debit aliran utama yang mengalir pada pipa backward facing step.

2.1.1 Mekanisme Terjadinya Separasi Aliran

Dalam sebuah aliran dimana tekanan mengalami penurunan searah dengan arah aliran, fluida akan mengalami percepatan dan lapisan batas akan menipis. Dalam aplikasinya, separasi aliran terjadi akibat dari efek adanya pembesaran penampang secara tiba-tiba atau *sudden enlargement expansion*. Efek ini akan membuat momentum aliran fluida menjadi lebih lemah dan menimbulkan adanya *back pressure* atau *adverse pressure gradient* sehingga terjadinya separasi aliran.



Gambar 2.1 Karakteristik aliran di dalam *backward facing step*
(Driver dkk, 1987)

Berdasarkan Gambar 2.1, aliran *backward facing step* dapat di bagi menjadi 3 wilayah utama, yaitu wilayah *shear layer*, wilayah *recirculation*, dan daerah *reattachment*. Karakteristik umum dari aliran *backward facing step* dimulai pada lapisan batas *upstream* yang terpisah pada tepi ujung *facing step* karena terjadi penurunan tekanan yang berkembang menjadi *shear layer* tipis. Dalam perjalanan aliran menuju *downstream*, ukuran dari *shear layer* mulai mengembang yang merupakan hasil penggabungan dari struktur turbulen yang terdapat didalam aliran ini. Wilayah dimana *shear layer* mengembang di sebut daerah *shear layer*. Struktur turbulen pada daerah *shear layer* ini mengalami peningkatan menjadi aliran *irrotational* yang menyebabkan pembentukan resikulasi kecepatan rendah pada daerah antara *shear layer* dengan dinding yang berdekatan. Daerah resikulasi kecepatan ini terdiri dari *vortex* utama dan *vortex* sekunder yang berdekatan dengan ujung sudut bawah *facing step* seperti ditunjukkan Gambar 2.1.

Penurunan tekanan yang terjadi pada aliran ini mengakibatkan *shear layer* bergerak turun membentuk kurva menuju dinding bagian bawah dan menimpa pada suatu titik yang disebut titik *reattachment*. Jarak horizontal antara bagian bawah *facing step* dengan titik *reattachment* didefinisikan sebagai panjang *reattachment*. Daerah resikulasi merupakan daerah disebelah *facing step* yang dibatasi *reattaching shear layer* pada dinding bagian atas dan oleh dinding bawah. Karena kehadiran *vortex* di dalam *separated shear layer*, sehingga menciptakan tekanan yang rendah dan memicu resikulasi. Daerah resikulasi ini juga dapat disebut sebagai *separation bubble* dimana didominasi oleh *vortex* dua dimensi yang besar (*primary vortex*) dan memiliki kecepatan resikulasi rendah. Selain *primary vortex* yang terbentuk, terlihat juga *vortex* sekunder yang terletak pada bagian ujung bawah *facing step*. Ilustrasi yang menggambarkan daerah resikulasi dapat lihat gambar 2.1. Setelah aliran terseparasi, maka akan terjadi aliran balik (*back flow*) yang kemudian membentuk aliran sekunder (*vortex*) pada daerah disekitar dinding yang

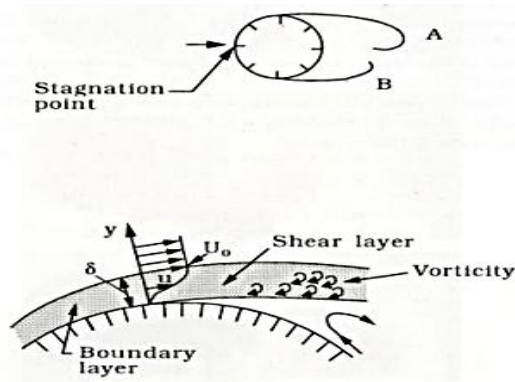
berekspansi. Aliran sekunder ini akan terus mengecil sampai titik *reattachment* tercapai.

Beberapa literatur terdahulu sulit menggambarkan daerah resirkulasi yang terdiri dari *vortex* utama dan *vortex* sekunder dikarenakan keterbatasan alat pengukuran. *Hot wire* dan tabung pitot merupakan instrumentasi yang umum digunakan pada percobaan terdahulu dalam pengukuran sifat aliran namun kedua instrumentasi ini tidak sensitif dan tidak akurat dalam pengukuran aliran yang sangat turbulente. Selanjutnya dengan perkembangan instrumentasi pengukuran, *Laser Doppler Anemometer* dan *Particle Image Velometry* (PIV) merupakan instrumentasi baru yang dapat melakukan pengukuran di daerah resirkulasi. Pada tahun 1999, **Scrano dkk** menggunakan metode PIV dalam pengukuran daerah resirkulasi pada *backward facing step*. Mereka mengusulkan *streamline* aliran pada pusat rotasi dari *vortex* utama di sebelah *facing step* memanjang dari ujung tepi *facing step* ke titik *reattachment* sedangkan pusat rotasi dari *vortex sekunder* tetap di dekat sebelah sudut bawah *facing step*. **Kuehn** (1980) dalam penelitiannya mengukur panjang *reattachment* sebagai fungsi terhadap rasio ekspansi (Er). Dari hasil pengukuran dan penelitian sebelumnya yang dilakukan, ia menunjukkan bahwa *reattachment* akan bertambah panjang sebanding linier dengan kenaikan rasio ekspansi hingga $Er = 1.7$. Titik *reattachment* merupakan salah satu parameter penting dalam aliran ini sehingga dilakukan pengukuran panjang *reattachment* terhadap perubahan bilangan Reynolds atau perubahan nilai Er . Ketika ketiga daerah di dalam *backward facing step* dapat dirubah atau dikendalikan, maka *drag*, getaran, dan kebisingan dapat dikurangi seperti yang diinginkan. Oleh karena itu, penting untuk memahami sifat aliran untuk dapat mengontrol dinamika aliran. Dalam penelitian sebelumnya, panjang *reattachment* menjadi parameter utama yang penting untuk memahami karakteristik aliran *backward facing step*.

2.2 Fenomena Lapis Batas (*Boundary Layer*)

Fenomena lapis batas (*boundary layer*) berkaitan erat dengan proses terjadinya gaya geser dinding serta karakteristik pemindahan panas dan momentum. Saat fluida dengan *free stream* mengalir menuju suatu body, maka akan terjadi suatu kondisi dimana aliran yang semula kecepatannya uniform (u_∞) akan menjadi tidak uniform lagi sehingga akan terbentuk distribusi kecepatan (*velocity distribution*) karena pengaruh kontur body yang dilewatinya. Distribusi kecepatan ini dimulai dari titik di permukaan body tersebut dimana aliran fluida mempunyai kecepatan nol (*zero velocity*) kemudian akan semakin bertambah besar ketika fluida menjauhi permukaan body tersebut. Kecepatan *free stream* yang semakin bertambah karena menjauhi permukaan body tersebut pada suatu saat tidak akan lagi bisa mempengaruhi kecepatan aliran fluida, yaitu dimana pengaruh tegangan geser akan hilang pada posisi tertentu dan kecepatan fluida mencapai nilai kecepatan fluida *nonviscous* ($u = 0.99u_\infty$) dan posisi tersebut merupakan batas daerah *viscous* dengan daerah *nonviscous*. Efek-efek viskositas akan terkonsentrasi dalam daerah yang disebut dengan *viscous area* yang tidak lain adalah lapisan batas (*Boundary Layer*). Sedangkan, diluar *boundary layer* efek viskositas dapat diabaikan (*non-viscous area*).

Lapisan batas (*Boundary Layer*) juga dapat diartikan sebagai suatu lapisan tipis (*layer*) dekat dengan permukaan *body* dimana pada daerah ini terjadi kondisi transisi yaitu kecepatan fluida tidak sama dengan kecepatan *free stream* yang kemudian akan menjadi sama dengan kecepatan *free stream* kembali, seperti terlihat pada gambar 2.2 berikut:



Gambar 2.2 *Boundary Layer* Pada Silinder

Lapisan batas terbagi menjadi tiga daerah, yakni lapisan batas laminar, daerah transisi, dan lapisan batas turbulen. Pada lapisan batas laminar, aliran atau lapisan fluida (*fluid layers*) bergerak secara halus antara satu sama lainnya atau dengan kata lain lapisan batas laminar memiliki *streamline* yang saling paralel satu sama lainnya. Pengaruh gesekan (tegangan geser) timbul akibat *velocity gradient* yang diakibatkan oleh viskositas fluida itu sendiri, sehingga perpindahan massa dan momentum antara aliran fluida terjadi dalam tingkat molekular saja. Sedangkan, pada lapisan batas turbulen, gerakan molekul fluida yang acak menyebabkan terjadinya fluktuasi kecepatan (baik pada arah paralel maupun tegak lurus terhadap aliran). Fluktuasi kecepatan pada arah tegak lurus aliran menyebabkan perpindahan massa dan momentum yang terjadi dalam jumlah yang sangat besar antar lapisan fluida. Hal inilah yang menyebabkan tegangan geser pada lapisan batas turbulen lebih besar jika dibandingkan dengan lapisan batas laminar.

Aliran pada backward facing step menimbulkan aliran sekunder yang akan merusak *boundary layer* dinding inlet bagian bawah. Di daerah terjadinya pembesaran penampang dimana aliran sekunder mulai terbentuk sampai pada titik pulihnya aliran fluida, *boundary layer* tidak akan terbentuk pada daerah itu. *Boundary layer* baru akan mulai terbentuk dari tercapainya titik reattachment length dan terus mengembang sampai ke outflow. Sedangkan, pada

dinding (*wall*) bagian atas sudah terbentuk *boundary layer* mulai dari inlet dan terus mengembang sampai ke outlet. Pada wall bagian bawah terbentuk *boundary layer* yang lebih tebal dibandingkan dengan *boundary layer* bagian atas, hal ini dikarenakan adanya perbesaran penampang pada bagian penampang bawah yang menimbulkan *vortex* yang menyebabkan aliran menjadi terganggu (*disturbance*) sehingga aliran turbulen yang sudah terfluktuasi, fluktuasinya semakin besar. Pada dinding (*wall*) bagian atas dimana aliran jet yang keluar didaerah dekat dinding atas tidak mengalami vortex, karena pada wall bagian atas tidak ada pembesaran penampang dan juga *wall* bagian atas berfungsi sebagai dinding penuntun (*guidance wall*).

2.3 Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds merupakan salah satu bilangan tidak berdimensi yang merupakan salah satu faktor dalam proses terbentuknya suatu aliran, baik aliran laminar maupun aliran turbulen. Semakin besar bilangan Reynolds, maka semakin besar aliran turbulen yang terbentuk. Aliran turbulen memiliki bentuk aliran lebih *blunt* dari aliran laminar, sehingga momentum aliran turbulent didekat dinding lebih besar yang mengakibatkan aliran ini lebih tahan terhadap tegangan geser dan *adverse pressure gradient*. Persamaan bilangan Reynolds sebagai berikut :

$$Re_{Dh} = \frac{\rho \cdot U_{ref} \cdot D_h}{\mu} \dots\dots\dots 2.1$$

Dimana :

- ρ : massa jenis fluida (kg/m³)
- U_{ref} : central velocity fluida pada inlet test section (m/s)
- D_h : diameter hidorlik (m)
- μ : viskositas kinematis fluida (kg/ms)

2.3.1 Aliran Laminer

Adalah aliran fluida yang ditunjukkan dengan gerak partikel-partikel fluidanya sejajar dan garis-garis arusnya halus. Dalam aliran laminar, partikel partikel fluida seolah-olah bergerak sepanjang lintasan-lintasan yang halus dan lancar, dengan satu lapisan meluncur secara mulus pada lapisan yang bersebelahan. Sifat kekentalan zat cair berperan penting dalam pembentukan aliran laminar. Aliran laminar bersifat *steady* maksudnya alirannya tetap. “Tetap” menunjukkan bahwa di seluruh aliran air, debit alirannya tetap atau kecepatan aliran tidak berubah menurut waktu. Aliran fluida pada pipa, diawali dengan aliran laminar kemudian pada fase berikutnya aliran berubah menjadi aliran turbulen. Fase antara laminar menjadi turbulen disebut aliran transisi. Aliran laminar mengikuti hukum Newton tentang viskositas yang menghubungkan tegangan geser dengan laju perubahan bentuk sudut. Tetapi pada viskositas yang rendah dan kecepatan yang tinggi aliran laminar tidak stabil dan berubah menjadi aliran turbulen. Bisa diambil kesimpulan mengenai ciri- ciri aliran laminar yaitu: fluida bergerak mengikuti garis lurus, kecepatan fluidanya rendah, viskositasnya tinggi dan lintasan gerak fluida teratur antara satu dengan yang lain.

2.3.2 Aliran Turbulen

Kecepatan aliran yang relatif besar akan menghasilkan aliran yang tidak laminar melainkan kompleks, lintasan gerak partikel saling tidak teratur antara satu dengan yang lain. Sehingga didapatkan Ciri dari aliran turbulen: tidak adanya keteraturan dalam lintasan fluidanya, aliran banyak bercampur, kecepatan fluida tinggi, panjang skala aliran besar dan viskositasnya rendah. Karakteristik aliran turbulen ditunjukkan oleh terbentuknya pusaran-pusaran dalam aliran, yang menghasilkan percampuran terus menerus antara partikel partikel cairan di seluruh penampang aliran.

2.4 Coefficient Pressure (Cp)

Pada sistem *ducting*, sistem perpipaan, atau model pengujian lainnya, sering sekali dilakukan modifikasi parameter $\Delta p / \rho V^2$, dengan memasukkan faktor $\frac{1}{2}$ untuk membuat *denominator* menyediakan tekanan dinamik. Maka terbentuklah rasio berikut :

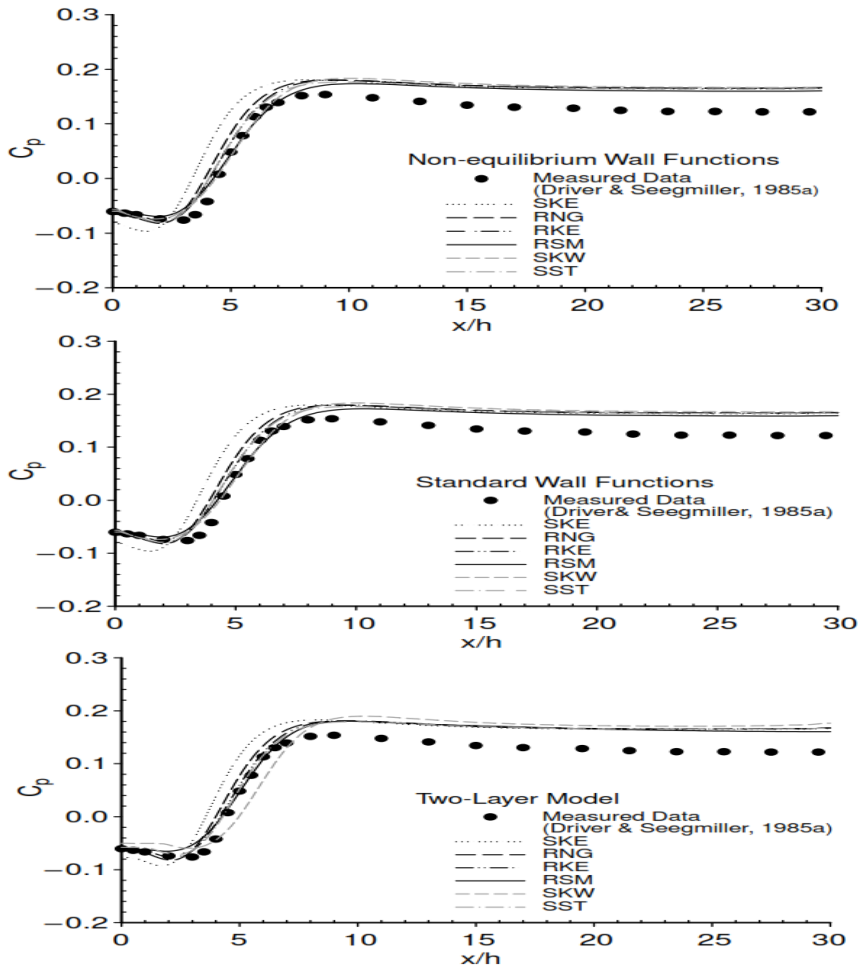
$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho V^2} \dots\dots\dots 2.2$$

Dimana Δp adalah tekanan lokal dikurangi dengan tekanan *freestream*, ρ dan V adalah properti dari aliran *freestream*. Rasio ini disebut dengan euler number atau yang biasa disebut dengan *pressure coefficient* (Cp).

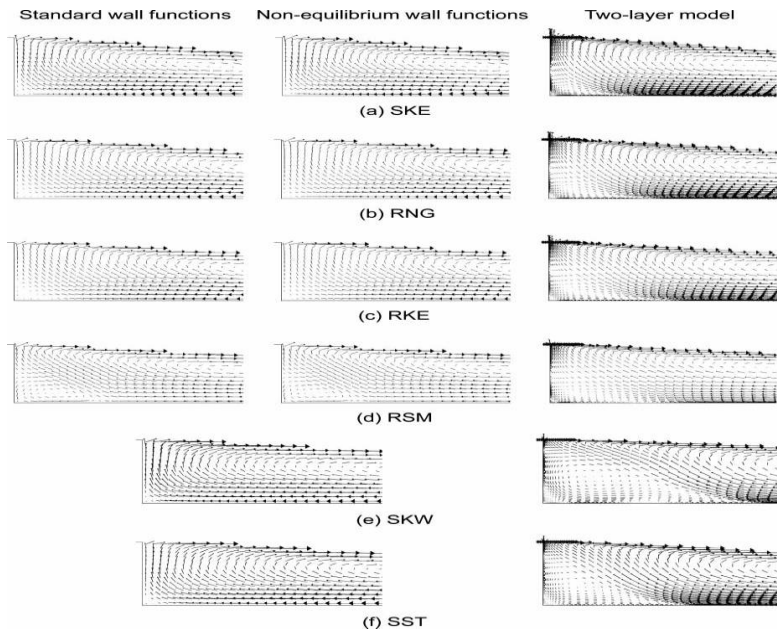
2.5 Karakteristik Aliran pada Backward Facing Step

Kim dkk. (2005) telah melakukan penelitian mengenai perbandingan *near wall treatment methods* untuk aliran turbulen dengan *reynolds number* 38000 pada *backward facing step*. Pada studi ini, geometri *backward facing step* yang digunakan sebagai benda uji memiliki tinggi pada sisi *upstream* adalah $8h$ ($h = 0,0127$ m). *Standart wall function*, *non equilibrium wall functions* dan *two layer* dimodelkan dengan perbedaan 6 model turbulen (SKE, RNG, RKE, RSM, SKW, SST) pada Re (38000).

Pada gambar 2.3 menunjukkan tren aliran perbandingan C_p terhadap x/h , dapat dilihat bahwa *coefficient pressure* dimulai sekitar -0.07 pada $x/h=0$ kemudian mulai turun sampai $x/h = 3$. Setelah itu naik dengan tajam dan kemudian cenderung konstan kembali. Kenaikan tren grafik C_p terhadap x/h menandakan adanya pengaruh perbesaran penampang sehingga aliran menjadi terseparasi.



Gambar 2.3 Grafik C_p terhadap x/h untuk perbedaan model turbulen dan *near-wall treatment* $\alpha=0^\circ$, $Re=38000$



Gambar 2.4 Perbandingan distribusi kecepatan pada sudut aliran *backward facing step* yang diprediksi dengan model turbulen yang berbeda $\alpha=0^\circ$, $Re= 38000$ (Kim dkk, 2005)

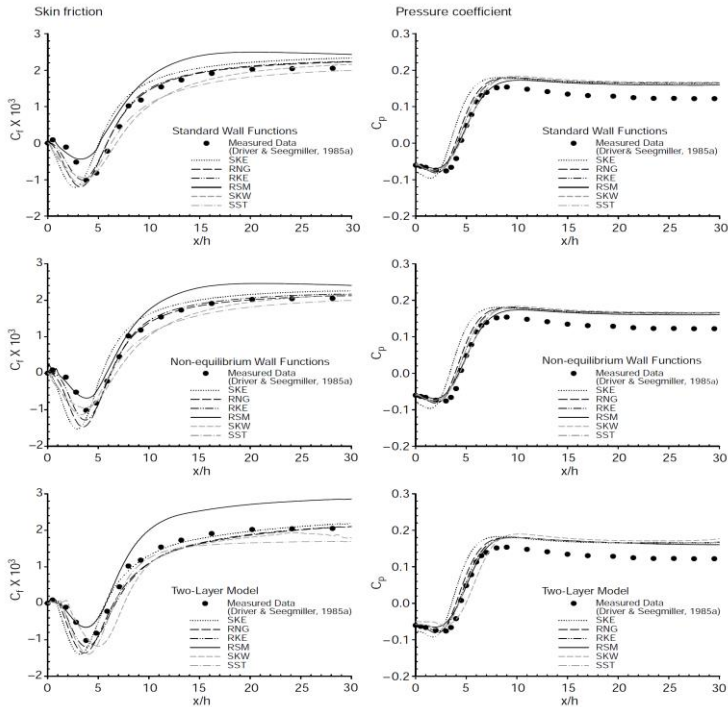
Hasil dari penelitian **Kim dkk (2005)** menunjukkan untuk aliran turbulen pada *backward facing step* yang paling baik adalah dengan memakai model turbulen RNG dan RKE dengan *wall treatment non equilibrium wall function* untuk memprediksi panjang *reattachment* dan *coefficient pressure* dibandingkan dengan model turbulen dan *wall treatment* lainnya.

Tabel 2.1 Perbandingan Panjang *Reattachment* (Kim dkk, 2005)

Turbulence models	Near-wall treatment methods			Measured (1985a)
	Standard wall functions	Non-equilibrium wall functions	Two-layer model	
Reattachment length (L_R/h) for 0° wall-angle				
SKE	4.9–5.1	5.3–5.5	5.7–5.8	6.26 ± 0.10
RNG	5.7–5.9	6.1–6.3	6.4–6.5	
RKE	5.7–5.9	6.1–6.3	6.6–6.7	
RSM	5.1–5.3	5.7–5.9	5.6–5.7	
SKW		6.7–6.9	7.5–7.6	
SST		6.1–6.3	6.5–6.6	

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan, panjang *reattachment* pada model *non-equilibrium wall* dengan turbulen model RSM memberikan nilai error paling besar yaitu 22% sdangkan turbulen model RNG dan RKE memberikan nilai error paling kecil yaitu 2,4% dibandingkan dengan hasil eksperimental. Pada *model two-layer* untuk turbulen model RNG memberikan error paling kecil sekitar 3,0% sedangkan turbulen model RSM memberikan error paling besar 16%. Secara keseluruhan nilai panjang *reattachment* di sajikan pada tabel 2.1. Dari tabel 2.1 menunjukan turbulen model paling baik dalam memprediksikan panjang *reattachment* adalah RNG dan RKE dengan *wall treatment non-equilibrium* karena nilai error nya paling kecil dibandingkan model turbulen dan *wall treatment* yang lain.

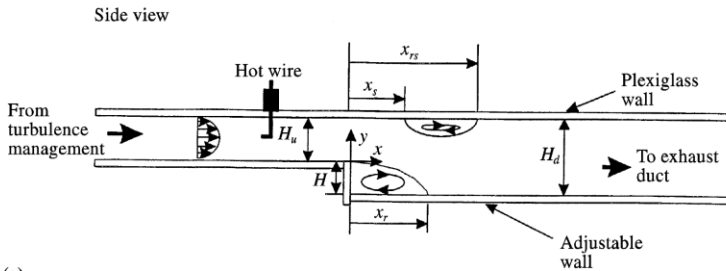
Kim dkk (2005) juga membandingkan nilai *static pressure coefficient* dan *skin-friction coefficient* yang disajikan pada gambar 2.5. Dari gambar 2.5 diamati metode *non-equilibrium wall functions* memprediksi nilai C_f paling kecil yaitu 31 % pada $x/h \geq 8$ dan *standard wall functions* memprediksi nilai C_f yaitu 38% pada $x/h \geq 8$ namun metode *near-wall treatment* memiliki perbedaan nilai C_p paling kecil yaitu sekitar 7.44% untuk $x/h \geq 8$. Untuk model turbulen baik nilai C_p maupun nilai C_f dengan model turbulen RNG dan RKE memberikan perbedaan dengan hasil eksperimental sekitar 10%.



Gambar 2.5 Perbandingan C_p dan C_f untuk model turbulen dan near – wall treatment yang berbeda (Kim dkk, 2005)

Lee dan Mateescu (1998) dalam penelitiannya yang berjudul “*Experimental and Numerical Investigation of 2-D Backward Facing Step Flow*” meneliti secara experimental dan pendekatan numerik mengenai backward facing step dengan alat ukur MHFS (*Multi-Element Hot-Film Sensor Arrays*) menyatakan, panjang *reattachment* bergerak secara linear dengan penambahan RE, jadi semakin besar RE maka semakin besar juga *reattachment length* baik secara eksperimental maupun numerikal untuk $Re \leq 3000$. Penelitian ini dilakukan dengan memasang *Hot Wire* pada saluran inlet untuk mengukur bilangan Reynolds yang digunakan dalam hal ini diukur kecepatan aliran dan *Multi-Element Hot-Film*

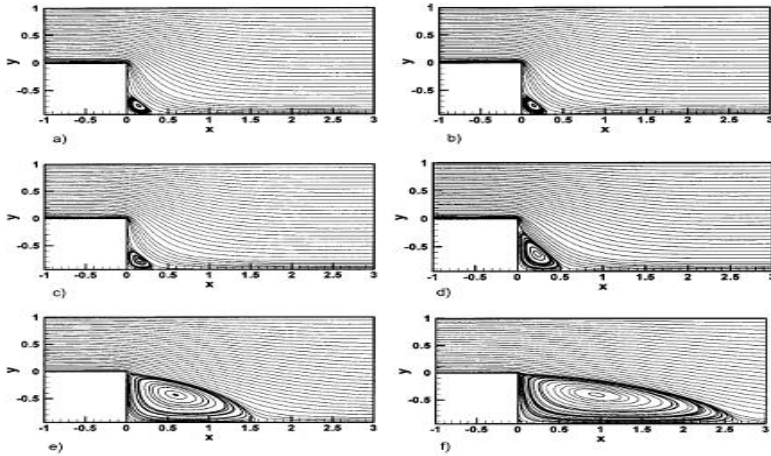
Sensor Arrays (MHFS) digunakan untuk mengukur panjang titik *reattachment* dan letak titik separasi aliran laminar serta transisi *fully developed*. Gambar 2.6 menunjukkan letak *hot wire* dan MHFS dalam eksperimental.



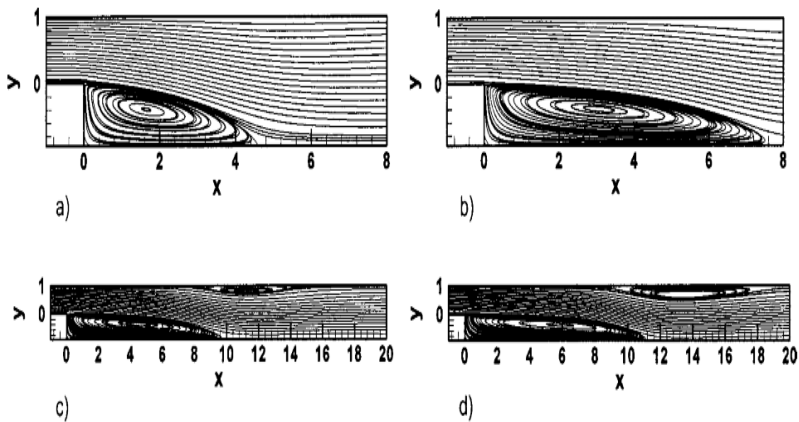
Gambar 2.6 Skema geometri eksperimental dari aliran *backward facing step* (Lee dan Mateescu, 1998)

Hasil pengukuran memberikan data letak separasi aliran dan titik pada bagian atas dan bawah dinding (x_r , x_{rs} , x_s dan $x_{rs} - x_s$) yang diukur dengan MHFS (*Multi-Element Hot-Film Sensor Arrays*). Panjang x_r pada bagian bawah dinding mengalami kenaikan sebanding dengan kenaikan bilangan Reynolds. Karena penurunan tekanan terbentuk oleh *sudden expansion*, daerah resikulasi ($x_{rs} - x_s$) teramati pada bagian atas dinding dengan kondisi awal meningkat lalu turun seiring kenaikan bilangan Reynolds.

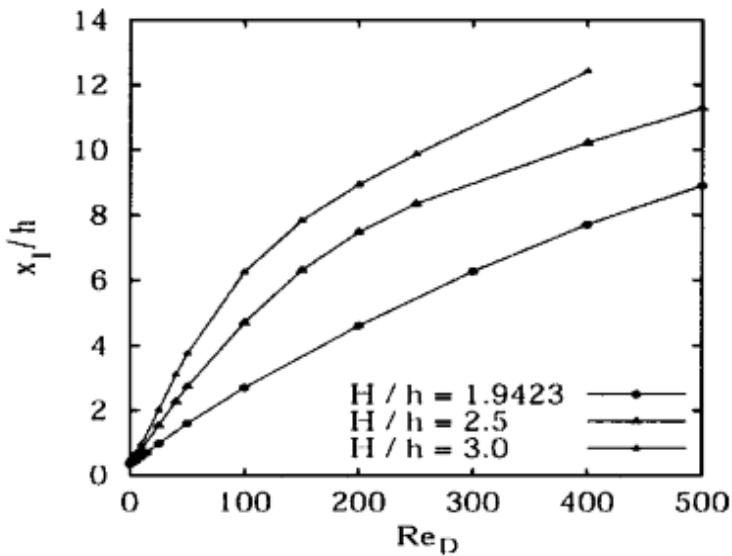
Biswas dan Breuer (2004) telah melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi rasio ekspansi (H/h : 1.9423, 2.5, 3.0) dengan rentang Re ($0.0001 \leq Re \leq 800$). Penelitian ini menggunakan simulasi dengan program *fastest-2D* dan *LESOCC*. Hasil penelitian **Biswas dan Breuer** pada ekspansi $H/h = 1.9423$ menyatakan bahwa semakin besar *Reynolds number* maka jarak *reattachment*-nya semakin panjang. Terlihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Aliran pada ekspansi rasio 1.9423 dengan variasi number; **a).** $Re = 0.0001$; **b).** $Re = 0.1$; **c).** $Re = 1$; **d).** $Re = 10$; **e).** $Re = 50$; **f).** $Re = 100$ (G. Biswas dan Breuer, 2004)



Gambar 2.8 Aliran pada ekspansi rasio 1.9423 dengan variasi number; **a).** $Re = 200$; **b).** $Re = 400$; **c).** $Re = 600$; **d).** $Re = 800$; (G. Biswas dan Breuer, 2004)

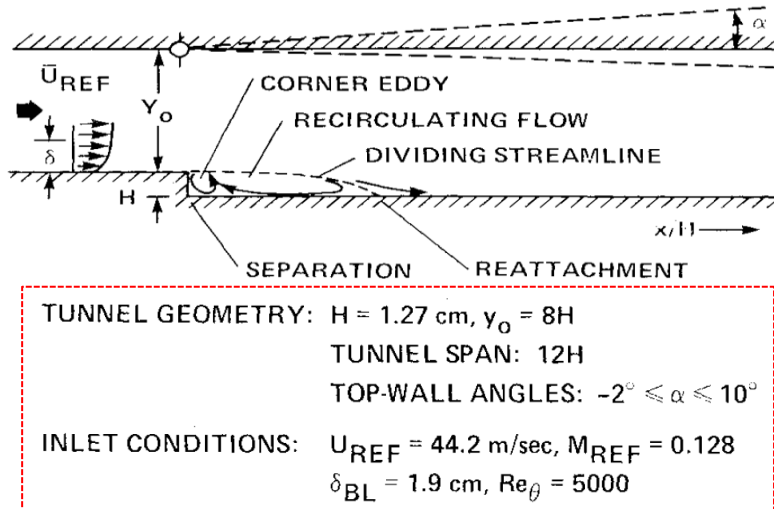


Gambar 2.9 Grafik jarak utama *recirculation* pada *backward facing step* (x/h) untuk perbedaan ekspansi $H/h = 1.9423, 2.5, 3.0$ (G. Biswas dan Breuer, 2004)

Gambar 2.9 menjelaskan dari penelitian **Biswas dan Breuer** bahwa besarnya nilai Re berbanding lurus dengan jarak *reattachment* untuk laminar namun untuk aliran turbulen cenderung konstan dan yang paling mempengaruhi *reattachment point* adalah tinggi dari *step*. Semakin besar nilai Re maka semakin jauh jarak *reattachment*, semakin kecil nilai Re maka jarak *reattachment* semakin pendek untuk aliran laminar. Grafik diatas juga menginformasikan bahwa tinggi *step* (h) sangat mempengaruhi jarak *reattachment*nya.

Driver dan Seegmiller (1985) dalam penelitiannya berjudul “*Features of reattaching turbulent shear layer in divergent channel flow*” meneliti secara eksperimental dan pendekatan secara

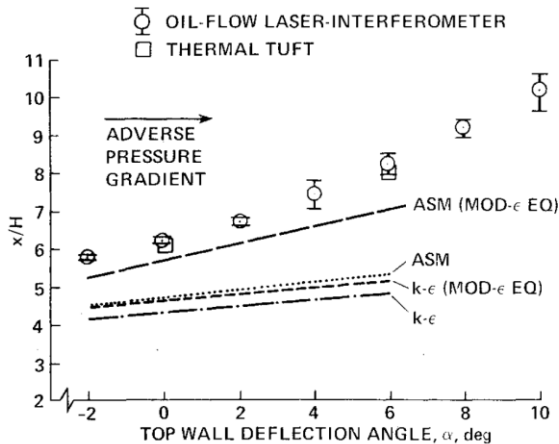
numerik mengenai *backward facing step* dengan *channel flow* yang berbeda. Dalam eksperimentalnya, geometri yang digunakan memiliki tinggi *facing step* $H = 1.27$ cm, tinggi inlet $Y_o = 10.1$ cm, lebar 15.1 cm. Pada dinding bagian atas diberi engsel pada jarak 0.6 cm dari titik *facing step* untuk memberikan variasi sudut pada dinding bagian atas (lihat gambar 2.10). Dalam penelitian ini nilai ekspansi rasio ($ER = 1.125$) kecil agar meminimalkan gradien tekanan *freestream* karena *sudden expansion*. Pada daerah inlet, kecepatan aliran yaitu 44.2 m/s, *Mach number* 0.128, ketebalan *boundry layer* 1.9 cm dan bilang Reynolds berdasarkan ketebalan momentum (Re_θ) adalah 5000. Untuk numerik dilakukan dengan 2 model turbulensi berbeda yaitu $k-\varepsilon$ dan *algebraic-stress* (ASM). Kedua model turbulensi ini memberikan hasil *reattachment* yang jauh berbeda dibandingkan dengan hasil eksperimental sehingga dilakukan modifikasi pada persamaan energi dari kedua model turbulensi tersebut.



Gambar 2.10 Geometri backward facing step dengan kondisi inlet
(Driver dan Seegmiller, 1985)

Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh **Driver** dan **Seegmiller** (1985), panjang *reattachment* pada daerah *downstream* dihasilkan dari interpolasi linier *skin-friction* pengukuran dengan *oil-flow laser interferometer*. Gambar 2.11 menunjukkan panjang *reattachment* lebih besar sebanding dengan perubahan sudut elevasi dinding atas. Lokasi titik *reattachment* dari pengukuran dengan metode *thermal-tuft* memberikan trend hasil yang sesuai dengan pengukuran *oil-flow laser interferometer*. Hasil simulasi dengan metode turbulensi $k-\epsilon$ dan ASM memberikan nilai yang berbeda dibandingkan dengan hasil eksperimental, oleh sebab itu dilakukan modifikasi pada kedua model turbulensi ini. Modifikasi pada model turbulen $k-\epsilon$ tidak memberikan peningkatan yang signifikan dibandingkan modifikasi pada model turbulen ASM yang lebih mendekati dengan hasil eksperimental.

Distribusi *static pressure* C_p pada daerah dinding bawah menunjukkan distribusi tekanan pada jarak $x/h > 8$ menjadi seragam sepanjang saluran keluar. Pada daerah *reattachment*, distribusi tekanan mengalami perubahan. Untuk kasus dinding atas dibelokkan, perubahan distribusi tekanan daerah *reattachment* lebih curam dibandingkan pada kasus dinding atas tidak dibelokkan. Baik hasil simulasi dengan model turbulensi $k-\epsilon$, maupun model turbulen ASM memberikan tren hasil yang samadengan eksperimental. Hasil pengukuran *skin friction* menunjukkan pada daerah resikulasi nilai *skin friction* memiliki nilai terbesar yang mengindikasi pada daerah tersebut pencampuran energi menghasilkan perubahan kecepatan pada daerah dasar dinding. Pada dinding atas yang dibelokkan, nilai *skin friction* lebih kecil dibandingkan pada dinding atas yang tidak dibelokkan, hal ini membuat titik *reattachment* lebih jauh. Secara simulasi, hasil dari model turbulensi ASM yang telah dimodifikasi lebih baik dibandingkan ketiga model turbulen lainnya walaupun memiliki trend hasil yang sama dengan eksperimental.

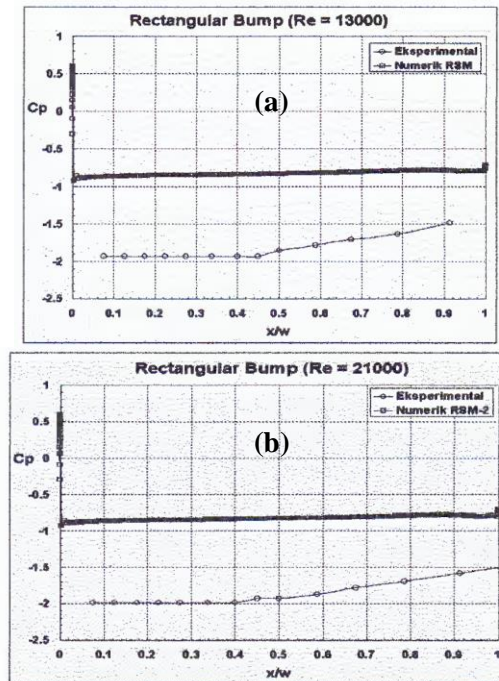


Gambar 2.11 Lokasi titik reattachmet terhadap perubahan sudut dinding atas (Driver dan Seegmiller, 1985)

Sutardi dan widodo (2008) melakukan penelitian eksperimental dan secara studi numerik mengenai karakteristik *boundary layer* pada permukaan pelat datar dengan gangguan *obstacle* berbentuk *rectangular*. *Obstacle* diletakkan secara melintang diatas pelat dengan panjang dan lebar pelat berturut – turut 700 mm dan 310 mm. Lebar dan tinggi *obstacle* yaitu 21 mm dan 42 mm. Parameter yang diukur yaitu kecepatan rata – rata (U), distribusi tekanan (P), dan karakteristik *drag*. Secara studi numerik dilakukan pada 2D dengan menggunakan perangkat lunak Fluent 6.2. Pemodelan numerik menggunakan pendekatan *2D-steady flow turbulent viscous Reynolds Stress Model (RSM)* pada dua bilangan Reynolds yaitu 1.3×10^4 dan 2.1×10^4 . Untuk *solution control* digunakan *second order* dan *second order upwind*.

Perbandingan antara distribusi C_p pada daerah *obstacle* hasil eksperimental dan numerik disajikan pada gambar 2.12 (a) dan (b). Berdasarkan gambar 2.12 ditunjukan harga C_p hasil simulasi yang sedikit lebih tinggi daripada harga C_p hasil eksperimen ini diperkirakan disebabkan oleh pemilihan harga kondisi *inlet*, seperti

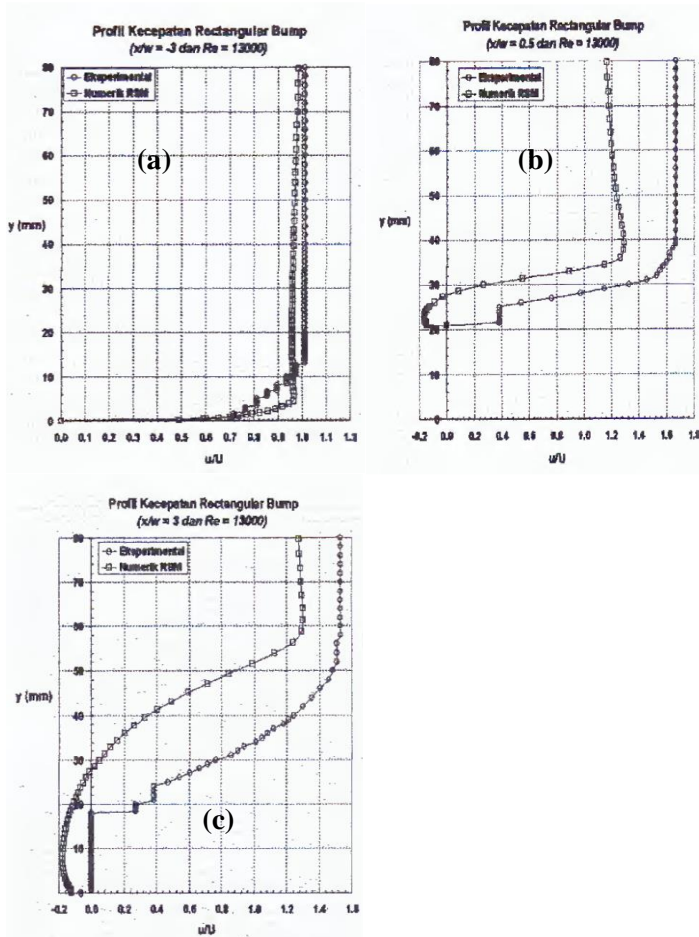
turbulence length scale dan *pressure inlet*, yang mungkin kurang sesuai. Pemilihan harga kondisi awal yang kurang sesuai ini lebih terasa pengaruhnya pada harga Re yang lebih tinggi (Gambar 2.12 (b)).



Gambar 2.12 Distribusi *static pressure* C_p pada daerah obstacle pada bilangan Reynolds (a) $Re = 1.3 \times 10^4$; (b) $Re = 2.1 \times 10^4$ (Sutardi dan widodo, 2008)

Selain distribusi nilai C_p , penelitian ini menunjukkan distribusi kecepatan rata – rata di daerah sebelum *obstacle*, pada *obstacle* dan setelah *obstacle* yang ditunjukkan pada gambar 2.13. Distribusi kecepatan hanya ditampilkan dalam $Re = 1.3 \times 10^4$ sedangkan pada $Re 2.1 \times 10^4$ memiliki nilai yang sama. Dari gambar 2.13 distribusi kecepatan hasil eksperimental dan hasil numerik memiliki *trend* yang sama walaupun pada *obstacle* nilai

kedua hasil tersebut berbeda. Hasil yang kurang memuaskan dari simulasi yaitu pada lokasi titik *reattachment* yang menunjukkan tidak terjadi perbedaan untuk dua harga Re yang berbeda. Untuk hasil secara eksperimental, titik *reattachment* pada Re yang lebih tinggi terletak pada lokasi di dekat *obstacle* dibandingkan lokasi titik *reattachment* pada Re yang lebih rendah.



Gambar 2.13 Profil kecepatan (u/U) pada berbagai posisi (a) $x/w = -3$; (b) $x/w = 0.5$; dan (c) $x/w = 3$, pada bilangan Reynolds 1.3×10^4 (Sutardi dan widodo, 2008)

2.6 Model Turbulen

Model turbulen adalah prosedur komputasi yang ada di fluent untuk mendekati sistem dari persamaan meanflow. Dalam aplikasinya melihat fluktuasi dari aliran yang turbulen tidak begitu penting, namun yang diperlukan adalah seberapa besar pengaruh turbulensi terhadap *mean flow*. Oleh karena itu model turbulen harus memberikan hasil yang akurat, sederhana dan mudah dijalankan.

2.6.1 Spalart-alararas

Spalart-Alamaras merupakan model yang memecahkan persamaan konservasi tunggal untuk *turbulent viscosity*. Persamaan konservasi ini terdapat *transport term* yang konvektif dan difusif. Model ini dikembangkan untuk digunakan pada kode tidak terstruktur yang mana biasa terdapat di industri *aerospace*. Model ini akurat dan ekonomis untuk aliran dengan separasi yang ringan dan *recirculation*. Sedangkan model ini lemah untuk aliran dengan separasi yang berat, aliran dengan gesekan bebas, dan *decaying turbulence*.

2.6.2 Model $k-\varepsilon$

Model $k-\varepsilon$ merupakan model turbulen dengan menggunakan dua persamaan, sehingga memungkinkan kecepatan turbulen dan skala panjang ditentukan secara independen. Model $k-\varepsilon$ difokuskan untuk mekanisme yang memberikan efek terhadap energi kinetik turbulen (per satuan massa) k . Lalu ε merupakan laju disipasi dari k .

- **Standard $k-\varepsilon$:** Pemodelan ini menggunakan persamaan *transport* dalam penyelesaian model untuk model untuk k dan ε . Model ini dapat digunakan untuk menyelesaikan *bouyancy*, *heating*, dan *compressibility*. Model ini tidak sesuai untuk aliran kompleks yang meliputi separasi dan *strong stream curvature*.

- **RNG (Renormalization-group) $k-\epsilon$:** Pemodelan ini merupakan variasi dari model *standard k-e*. Model ini sesuai untuk aliran yang mempunyai bilangan Reynolds rendah dan untuk memprediksi aliran dengan efek *swirling*.
- **Realizable $k-\epsilon$:** Pemodelan ini mempunyai beberapa batasan matematis pada bilangan Reynolds, namun konsisten dengan bentuk fisik aliran turbulen. Model ini mempunyai kelebihan yaitu lebih akurat untuk memprediksi laju penyebaran fluida dari pancaran suatu jet atau *nozzle*. Dengan menggunakan model ini dapat memberikan performa bagus untuk aliran yang melibatkan putaran, separasi, *recirculation*, dan lapisan batas yang mempunyai gradien tekanan yang besar.

2.6.3 Model $k-\omega$

Model ini termasuk model yang menggunakan dua persamaan dalam pemodelannya. Dalam model ω ini, sebuah *inverse time scale* terkait dengan turbulensi. Karakteristik numerik dari model ini cukup serupa dengan model $k-\epsilon$. Dalam model ini ω merupakan *specific dissipation rate*.

- **Standard $k-\omega$:** Pemodelan ini menggunakan dua persamaan *transport model* untuk memecahkan k dan ω . Model ini juga dapat digunakan untuk aliran dengan bilangan Reynolds yang rendah. Model ini dapat menampilkan transisi aliran dari yang awalnya laminar menjadi turbulen. Lalu model ini juga dapat pula menghitung *free shear* dan aliran *compressible*.
- **SST (Shear-stress transport) $k-\omega$:** Model ini merupakan variasi dari model *standard k- ω* yang dikembangkan untuk memadukan formulasi model *standard k- ω* yang stabil dan akurat pada daerah didekatat dinding dengan model $k-\omega$ yang memiliki keunggulan dalam *aliran free stream*.

2.6.4 Reynold Strees Number (RSM)

Model ini merupakan tujuh persamaan dalam pendekatannya, sehingga merupakan model turbulensi yang paling teliti. RSM mendekati persamaan RANS dengan menyelesaikan persamaan transport tambahan untuk enam *independent reynold streesses*. RSM akurat untuk memprediksi aliran kompleks seperti aliran *cyclone* aliran berotasi dan aliran terseparasi berat.

2.7 Kondisi Batas

Berikut ini adalah beberapa kondisi batas yang tersedia dalam piranti lunak simulasi CFD komersial antara lain:

2.7.1 *Flow inlet dan exit boundaries*

- **Pressure inlet:** kondisi batas ini biasa digunakan untuk mendefinisikan tekanan fluida pada aliran pada *inlet*, beserta dengan seluruh properti aliran lainnya. Kondisi batas ini sesuai untuk perhitungan aliran *incompressible* maupun *compressible*. Kondisi batas *pressure inlet* dapat digunakan ketika tekanan *inlet* diketahui namun laju aliran tidak diketahui. Situasi ini muncul dalam banyak situasi praktis, termasuk aliran *bouyancy-driven*. Kondisi batas ini juga dapat digunakan untuk mendefinisikan pada batas "bebas" dalam aliran eksternal.
- **Velocity Inlet:** kondisi batas ini digunakan untuk mendefinisikan kecepatan aliran, beserta dengan seluruh properti aliran skalar yang relevan pada *inlet* aliran. Properti *total* (stagnasi) dari aliran tidak tetap, jadi akan meningkat terhadap nilai apapun yang diperlukan untuk menyediakan distribusi kecepatan yang diinginkan. Kondisi batas ini dimaksudkan untuk aliran *Incompressible*, dan kondisi ini berguna dalam aliran *compressible* yang akan mengarahkan ke hasil nonfisik karena kondisi ini mengizinkan kondisi stagnasi pada

halangan *solid*, karena hal ini dapat menyebabkan properti *inflow stagnation* menjadi sangat tidak seragam.

- **Mass flow Inlet:** kondisi batas ini digunakan untuk menyediakan laju aliran massa yang telah dirumuskan atau distribusi fluks massa pada *inlet*. Secara fisik, menentukan fluks massa memungkinkan tekanan total bervariasi dalam menanggapi solusi *interior*. Hal ini berbeda dengan kondisi batas *pressure inlet*, dimana tekanan total adalah tetap sedangkan fluks massa bervariasi.
- **Inlet vent:** kondisi batas ini digunakan untuk pemodelan sebuah *inlet vent* dengan sebuah *loss coefficient* tertentu, arah aliran, *ambient pressure*, dan suhu ambien.
- **Intake fan:** kondisi batas ini digunakan untuk pemodelan sebuah aliran eksternal dari *intake fan* dengan *pressure Jump* tertentu, arah aliran, *ambient pressure*, dan *ambient temperature*.
- **Pressure outlet:** Kondisi batas ini membutuhkan spesifikasi dari tekanan statis (*gauge*) pada *outlet boundary*. Nilai dari tekanan statis yang telah ditentukan digunakan hanya ketika bekerja pada aliran *subsonic*, tekanan yang telah ditentukan tidak akan lagi digunakan, tekanan akan diekstrapolasikan dari aliran dalam *interior*. Seluruh kuantitas aliran lainnya diekstrapolasikan dari *interior*.
- **Pressure far-field:** kondisi batas ini digunakan dalam pemodelan kondisi aliran bebas tak hingga, dengan *free-stream Mach number* dan kondisi statis yang ditentukan. Kondisi batas ini seringkali disebut dengan kondisi batas karakteristik, karena menggunakan informasi karakteristik (*Riemann invariants*) untuk menentukan variabel aliran pada batas. Kondisi batas ini berlaku hanya jika kepadatan dihitung

dengan menggunakan hukum gas ideal selain itu tidak disarankan menggunakan kondisi batas ini.

- **Outflow:** kondisi batas ini digunakan untuk pemodelan aliran keluar yang mana kecepatan aliran dan tekanannya tidak diketahui sebelum solusi masalah aliran dilakukan. Kondisi batas ini tidak dapat digunakan dalam kasus aliran *compressible* aliran *unsteady* dengan densitas bervariasi meskipun merupakan aliran *incompressible*, dan masalah yang melibatkan kondisi batas *pressure inlet*.
- **Outlet Vent:** Kondisi batas ini digunakan untuk pemodelan keluaran dari *vent* dengan sebuah *loss coefficient* tertentu, *ambient pressure*, dan *ambient temperature*.
- **Exhaust fan:** Kondisi batas ini digunakan untuk pemodelan keluaran dari *vent* dengan sebuah *pressure jump* tertentu, dan *ambient pressure*.

2.7.2 Wall, repeating, dan pole boundaries

- **Wall:** Kondisi batas ini digunakan untuk daerah fluida dan padat terikat. Dalam aliran viskos, kondisi batas tanpa slip diberlakukan pada dinding secara *default*, tetapi dapat juga menentukan komponen kecepatan tangensial dalam hal gerakan translasi atau rotasi dari batas dinding, atau model "slip" dinding dengan menentukan gesekan.
- **Symmetry:** kondisi batas ini digunakan ketika ketertarikan geometri secara fisik, pola yang diekspektasikan dari solusi aliran/termal, memiliki kesimetrisan *mirror*. Kondisi ini dapat juga menggunakan model *zero-shear slip walls* dalam aliran viskos. Perlu berhati-hati dalam menentukan lokasi batas simetri. Pada garis tengah dari geometri *axisymmetric*, perlu digunakan tipe *axis boundary* dari pada kondisi batas simetris.
- **Periodic:** kondisi batas ini digunakan ketika geometri fisik yang diperhatikan dan pola perkiraan dari solusi aliran/termal mengalami pengulangan alami secara periodik. Pada piranti lunak tersebut terdapat dua tipe

kondisi, yang pertama tidak mengizinkan *pressure drop* di *periodic planes*, sedangkan tipe kedua mengizinkan adanya *pressure drop* pada kondisi periodik secara translasional, memungkinkan model untuk menjadi aliran periodik "*fully-developed*".

- **Axis:** kondisi batas ini harus digunakan sebagai garis tengah dari geometri *axisymmetric*. Hal ini juga dapat digunakan untuk garis tengah segi empat atau *hexahedral* jaringan silinder-polar. Definisi kondisi batas pada *axis boundaries* tidak diperlukan.

2.7.3 Internal cell zones

- **Fluid:** sebuah zona fluida merupakan sebuah kelompok sel yang mana seluruh persamaan aktifnya telah terungkap. Satu-satunya *input* yang diperlukan untuk zona fluida adalah tipe dari material fluida.
- **Solid:** sebuah zona *solid* merupakan sebuah kelompok sel yang mana hanya permasalahan konduksi kalor yang terpecahkan, tidak ada persamaan aliran yang terungkap. Material diperlakukan seperti padatan atau juga seperti fluida, tetapi ini diasumsikan bahwa tidak terjadi konveksi. Satu-satunya *input* yang diperlukan untuk zona *solid* adalah tipe dari material *solid*. Harus diindikasikan bahwa material yang manakah yang terkandung zona *solid*, sehingga properti material yang sesuai yang akan digunakan. Pilihan input memungkinkan untuk mengatur tingkat laju kalor bangkitan volumetris (*heat source*) atau nilai pasti dari suhu. Selain itu juga dapat menentukan pergerakan untuk zona *solid*. Jika terdapat batas periodik rotasional yang berdekatan dengan zona *solid*, perlu ditentukan sumbu rotasinya. Jika memodelkan radiasi menggunakan model DO dapat ditentukan apakah ada atau tidak material yang berpartisipasi dalam radiasi.

2.7.4 *Internal face boundaries*

- ***Fan:*** model ini merupakan model *parameter lumped* yang dapat digunakan untuk menentukan dampak dari penggemar dengan karakteristik yang dikenal pada beberapa medan aliran yang lebih besar. Jenis batas *fan* yang memungkinkan untuk dapat memberikan *input* sebuah kurva *fan* empiris yang mana mengatur antara *head (pressure rise)* dan laju aliran (kecepatan) sepanjang sebuah elemen *fan*. Model *fan* tidak memberikan gambaran akurat mengenai rincian aliran melalui bilah *fan*. Sebaliknya memprediksi jumlah aliran melalui *fan*. *Fan* dapat digunakan dalam hubungannya dengan sumber aliran lain, atau sebagai satu-satunya sumber aliran dalam simulasi. Dalam kasus terakhir, laju aliran sistem ditentukan oleh keseimbangan antara kerugian dalam sistem dan kurva *fan*.
- ***Radiator:*** model ini merupakan sebuah model yang parameternya disamakan untuk elemen pertukaran panas (contoh: radiator atau kondensor), tersedia dalam piranti lunak ini. Jenis batas radiator memungkinkan anda untuk menentukan baik penurunan tekanan dan koefisien perpindahan panas sebagai fungsi dari *kecepatan* normal radiator.
- ***Porous jump:*** kondisi ini digunakan untuk model dengan "membran" tipis yang diketahui memiliki karakteristik kecepatan. Hal ini pada dasarnya adalah penyederhanaan satu dimensional dari *model porous media* yang tersedia untuk zona sel. Contoh penggunaan untuk kondisi *porous jump* meliputi pemodelan *pressure drop* melalui layar dan filter pemodelan radiator bila tidak memerhatikan perpindahan panas. Model sederhana ini harus digunakan bila memungkinkan karena lebih kuat dan menghasilkan konvergensi yang lebih baik.

- **Wall:** kondisi batas ini digunakan untuk mendefinisikan suatu permukaan menjadi dinding atau halangan.
- **Interior:** kondisi batas ini digunakan untuk mendefinisikan suatu permukaan menjadi interior, maksudnya adalah aliran mampu untuk melalui kondisi batas ini

BAB III

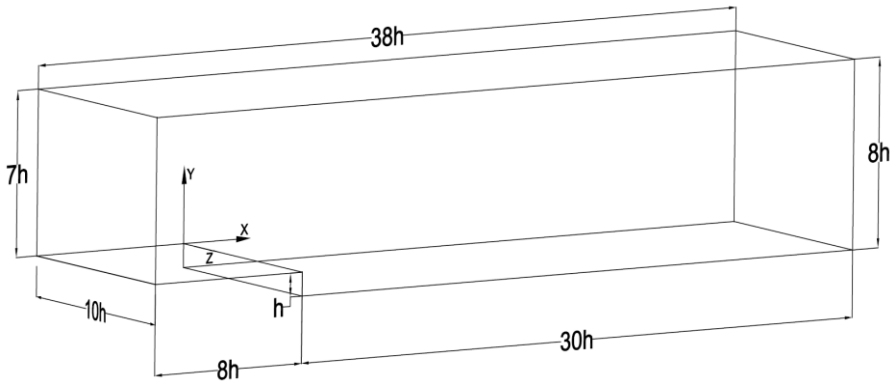
METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini akan membahas metode yang akan digunakan. Penelitian ini dilakukan secara numerik dengan menggunakan program CFD untuk menganalisis karakteristik aliran, distribusi tekanan, *skin friction coefficient*, profil kecepatan dan fenomena-fenomena yang terjadi pada *backward facing step*.

3.1 Geometri *Backward Facing Step*

Pada penelitian ini menggunakan benda *backward facing step* dengan memvariasikan jarak bodi pengganggu berupa (*bump*). Seperti yang dapat dilihat pada gambar 3.1. Spesifikasi benda uji dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Tinggi step (h) : 12.7 mm
- Panjang sisi *upstream* : 8h
- Panjang sisi down stream : 30h
- Tinggi *inlet* : 7h
- Lebar geometri penampang : 10h
- Tinggi *outlet* : 8h



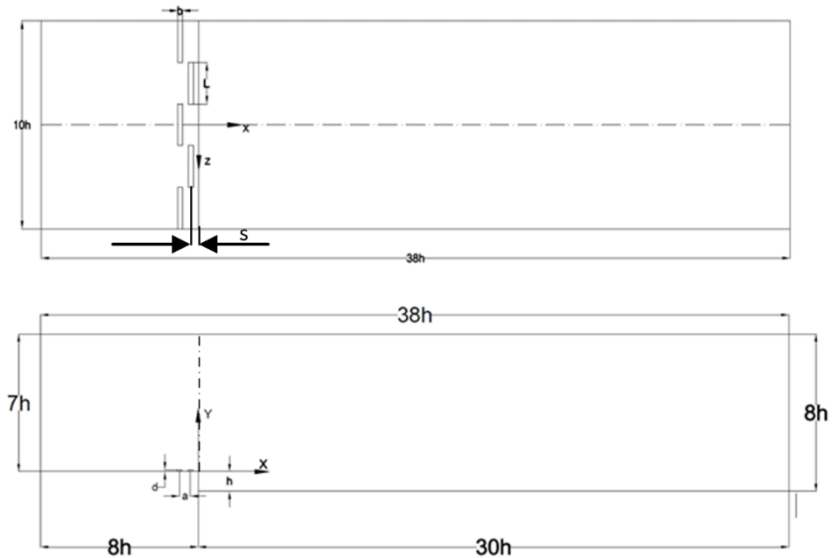
Gambar 3.1 Geometri penampang *backward facing step* tanpa *bump*

3.2 Metode Numerik

Penelitian ini menggunakan program CFD komersial untuk melakukan pendekatan numerik dan membuat geometri model awal serta melakukan diskritisasi (meshing) pada model. Secara umum, urutan kerja pada penelitian ini dimulai

3.2.1 Tahap *pre-processing*

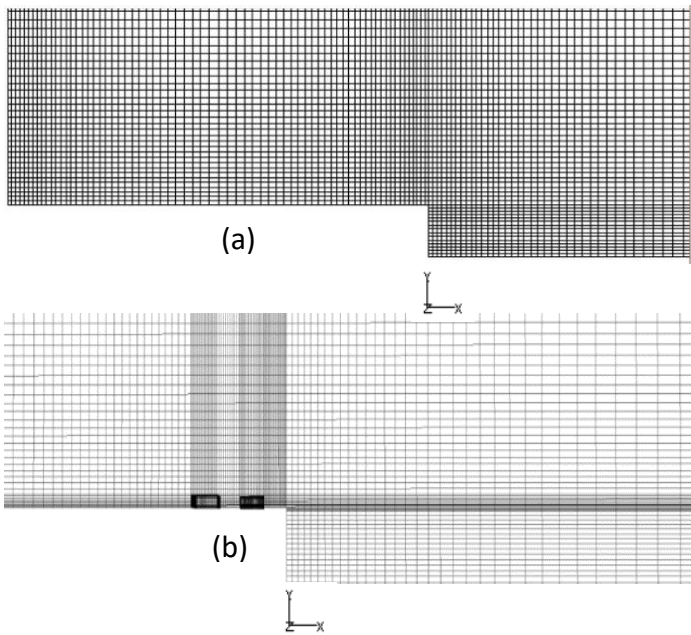
- a) Membuat model tiga dimensi benda uji (*backward facing step*) dibuat dengan mengacu pada geometri sesuai ukuran yang telah ditentukan. Penelitian ini memvariasikan jarak bodi pengganggu seperti tampak pada gambar 3.2:

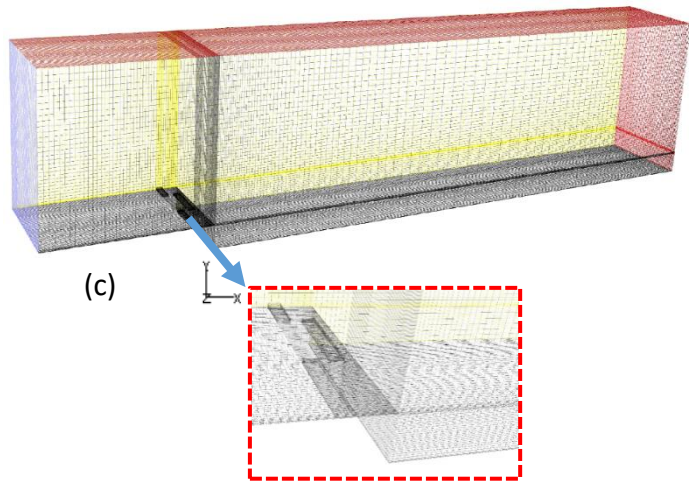


Gambar 3.2 Variasi Jarak bodi pengganggu *staggered*

- Tinggi step (h) : 12.7 mm
- Panjang sisi *upstream* : 8h
- Panjang sisi down stream : 30h
- Tinggi *inlet* : 7h
- Lebar geometri penampang : 10h
- Tinggi *outlet* : 8h
- Tinggi *bump* (d) : 0.1h
- Jarak antar bump (a) : 0.55h
- Lebar bump (b) : 0.25h
- Jarak bodi pengganggu *staggered* (L) : 2h
- Variasi jarak bump (s) : 0.25h, 0.35h,
Terhadap tinggi step dan 0.4h

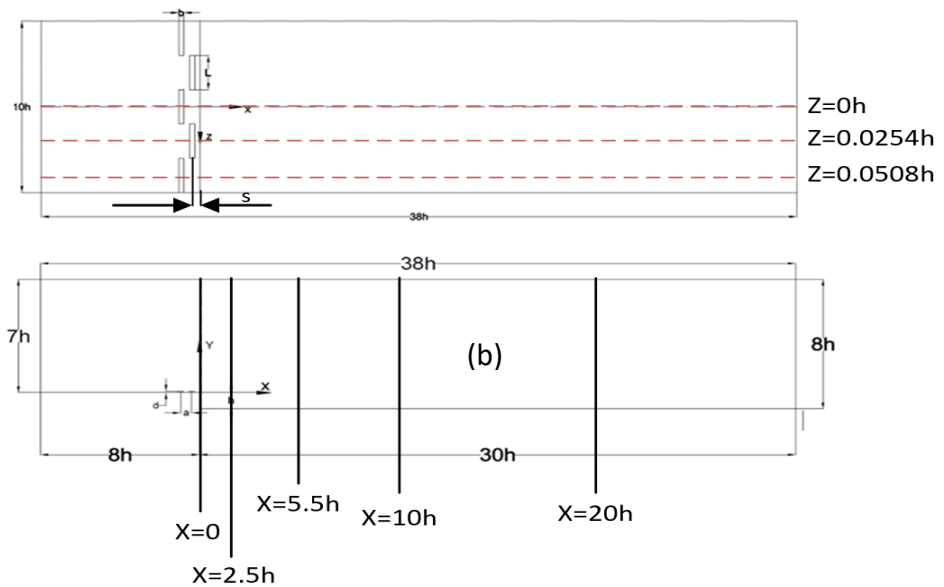
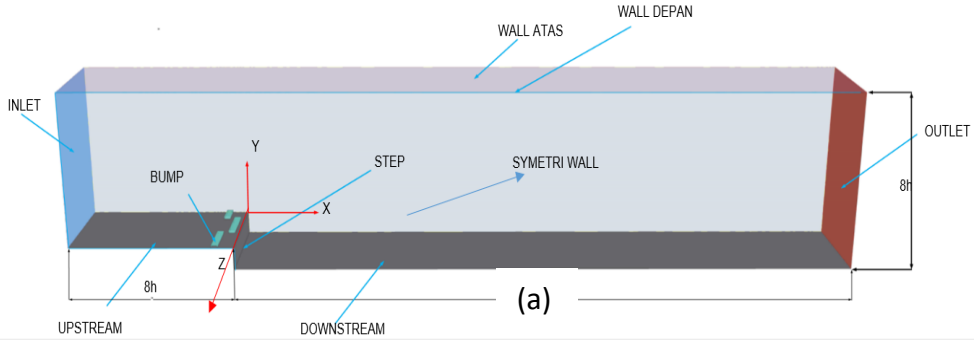
- b) Pembuatan meshing dengan distribusi mesh yang lebih rapat pada dinding (*wall*) bagian atas dan dinding (*wall*) bagian bawah, sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 3.3





Gambar 3.3 (a) *Meshing* benda uji tanpa *bump*, (b) *Meshing* pada daerah *bump*, (c) *Meshing* pada benda uji *backward facing step*

- c) Mendefinisikan kondisi batas dengan maksud untuk menentukan batasan serta parameter-parameter yang digunakan pada penelitian ini. Kondisi *inlet* yaitu *velocity inlet*. Kondisi batas *outlet* adalah *outflow*. *Rectangular bump* yang disusun secara *staggered* didefinisikan sebagai *wall*. Benda uji dibuat simetri karena diasumsikan aliran disepanjang koordinat *z* hampir sama.



Gambar 3.4 (a) Domain simulasi dan kondisi batasnya,
 (b) Posisi pengambilan data C_p , C_f , dan profil kecepatan
 pada $Z=0$, $Z=0.0254$ dan $Z= 0.0508$

3.2.2 Tahap *Post Processing*

Untuk penyelesaian metoda numerik digunakan bantuan software fluent Langkah-langkah yang dilakukan dalam melakukan pemodelan adalah sebagai berikut:

a. Grid

Pada langkah ini, yang dilakukan adalah mengimport grid yang telah dibuat pada software gambit. Pada proses pembuatan grid ini perlu diberikan grid independensi, yaitu proses penambahan meshing sampai hasil yang didapatkan sudah tidak berubah lagi walaupun jumlah *cell*-nya ditambah.

b. Models

Langkah ini merupakan pemodelan aliran (estimasi karakteristik aliran), penentuan model turbulen yang digunakan, penentuan besarnya konstanta yang digunakan serta menentukan solver yang digunakan. Pemodelan yang digunakan adalah $k-\varepsilon$ *Realizable*. Pemodelan ini dipilih karena bisa memberikan performa yang baik untuk aliran yang melibatkan separasi, resirkulasi, aliran pada jet atau *nozzle*. Kemudian untuk *near wall treatment* memilih *non-equilibrium wall function* sesuai dengan yang digunakan Kim dkk (2005).

c. Material

Pada tahap dimasukkan data *properties* material fluida yaitu udara dengan *density* (ρ) $1,225 \text{ kg/m}^3$ dan *viskositas absolute* (μ) $1,7894 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$

d. *Operating Condition*

Operating condition menggunakan kondisi STP (*Standard Temperatur and Pressure*)

e. *Boundary Condition*

Boundary condition menentukan parameter-parameter dan batasan yang mungkin terjadi pada aliran, yaitu dengan pemberian beban kecepatan, tekanan maupun kondisi batas turbulen pada *inlet* dan *outlet*. *Inlet* merupakan sisi aliran masuk, yang didefinisikan sebagai *velocity inlet (uniform velocity)*. Dinding saluran dan benda uji didefinisikan sebagai *wall* dan simetri. *Outlet* didefinisikan sebagai *outflow*. Dengan memberikan $Re = 3.8 \times 10^4$ dan nilai $h = 0.0127 \text{ m}$ maka didapat nilai $U_{\infty} = 44.2 \text{ m/s}$.

f. Solution

Solution pada penelitian ini akan menggunakan *discretization second order* untuk *pressure*, *second-order upwind* untuk *momentum*, *turbulence kinetic energy* dan *turbulence dissipation rate*.

g. Initialize

Merupakan langkah perhitungan untuk mendapatkan hasil yang konvergen pada tahap iterasi, *initialize* dihitung dari *velocity inlet*.

h. Monitoring Residual

Monitoring Residual adalah tahap penyelesaian masalah, berupa proses iterasi hingga mencapai harga kriteria konvergensi yang diinginkan. Kriteria *konvergensi* adalah kesalahan/perbedaan antara tebakan awal dan hasil akhir dari iterasi yang dilakukan oleh perangkat lunak CFD komersial pada masing-masing persamaan yang digunakan. Kriteria dan nilai residual monitors yang digunakan dalam simulasi pemodelan ini adalah sebagai berikut:

Tabel 3.1 Monitoring Nilai Residual

<u>No</u>	<u>Residual</u>	Kriteria Konvergensi
1	<i>Continuity</i>	10^{-5}
2	$x - \text{velocity}$	10^{-4}
3	$y - \text{velocity}$	10^{-4}
4	<i>Energy</i>	10^{-6}
5	k	10^{-4}
6	Epsilon	10^{-4}

i. Iterasi

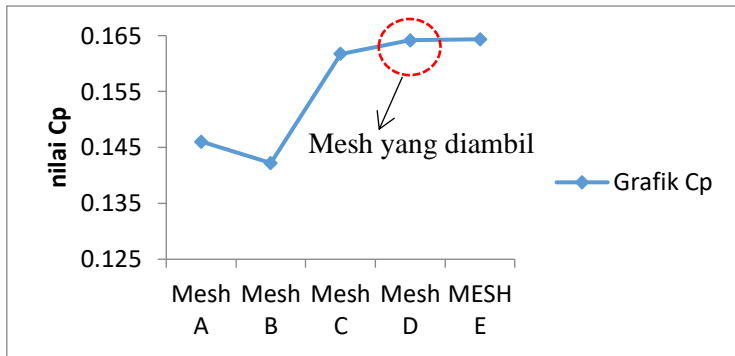
Iterasi adalah langkah untuk melakukan perhitungan yang diperlukan proses iterasi sampai menghasilkan solusi yang konvergen.

j. Grid Independensi

Untuk mendapatkan ketepatan data pada langkah *post processing*, perlu dilakukan *grid independency*. Grid Independensi dapat menentukan tingkat serta struktur grid terbaik dan paling efisien agar hasil pemodelan mendekati data eksperimen.

Tabel 3.2 Hasil *grid independensi* benda uji tanpa *bump*

MESH	CELLS	Y^+	C_p
Mesh A	735000	210.325	0.14605
Mesh B	975260	150.35	0.14222
Mesh C	1279000	61.386	0.16173
Mesh D	1460000	51.235	0.16419
MESH E	1852500	50.582	0.16435



Gambar 3.5 Grafik *grid independency*

Berdasarkan tabel 3.2 mesh A merupakan meshing yang paling renggang dengan jumlah *cells* 735000, sedangkan mesh E merupakan meshing yang paling rapat dengan jumlah *cells* 1852500. Nilai Cp ini diambil pada titik ($L = 28h$) bagian *downstream*. Grafik memperlihatkan trend yang naik, namun berbeda pada mesh D yang memperlihatkan kenaikan grafik yang cukup stabil dari pada mesh yang lain. Mesh E dan Mesh D membuktikan bahwa semakin rapat meshing maka akan memberikan tingkat ketelitian yang semakin baik, sehingga dipilihlah Mesh D untuk penelitian benda uji yang menggunakan *bump* karena jumlah *cells* yg dimiliki oleh Mesh D lebih sedikit daripada Mesh E sehingga memori yang terpakai pada saat *processing* lebih sedikit sehingga dapat mempercepat waktu *processing* saat menjalankan software *fluent*.

k. Post Processing

Post processing merupakan penampilan hasil serta analisa terhadap hasil yang telah diperoleh. Hasilnya akan ditampilkan berupa data kuantitatif dan data kualitatif.

- Data kuantitatif :
 - ✓ Grafik profil kecepatan
 - ✓ Grafik intensitas turbulensi
 - ✓ Grafik C_p fungsi (x/h)
 - ✓ Grafik C_f fungsi (x/h)
- Data kualitatif :
 - ✓ Kontur
 - Kecepatan
 - Intensitas turbulensi
 - tekanan
 - ✓ Vektor kecepatan
 - ✓ Pathline kecepatan

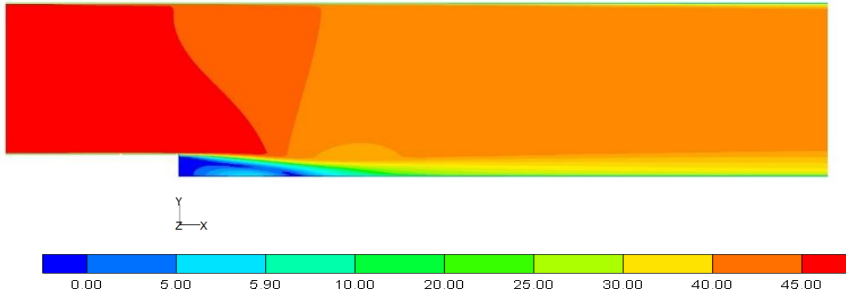
BAB IV

DATA DAN ANALISA HASIL PENELITIAN

Bab ini akan menjelaskan mengenai analisa dan pembahasan hasil simulasi numerik *backward facing step* tanpa menggunakan *bump* dan dengan penambahan *bump* berupa *stagger rectangular bump*. Dari hasil yang didapatkan, nantinya akan dibandingkan bagaimana pengaruh yang ditimbulkan dari penambahan *stagger rectangular bump*. *Reynolds* yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebesar 3.8×10^4 . Data yang diperoleh dari hasil simulasi berupa data kuantitatif dan kualitatif. Data kuantitatif dipresentasikan dalam bentuk grafik, yaitu profil kecepatan, distribusi *skin friction* (C_f), distribusi *pressure coefficient* (C_p). Sedangkan data kualitatif dipresentasikan dalam bentuk visualisasi aliran. Visualisasi ini bertujuan untuk memperjelas hasil yang didapatkan dari data kuantitatif, yaitu berupa kontur kecepatan, vektor kecepatan, kontur intensitas turbulensi, dan kontur tekanan statis.

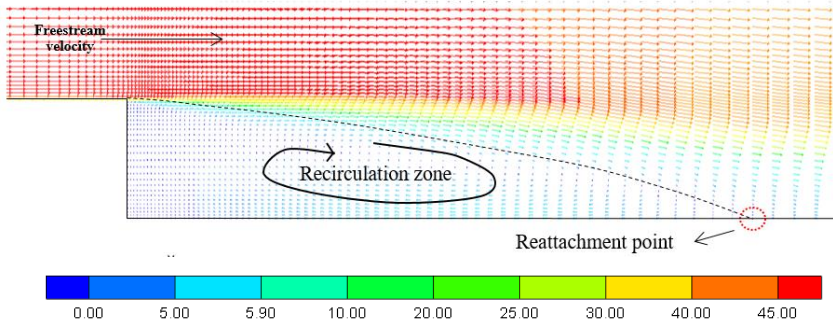
4.1 Analisa aliran *backward facing step* tanpa *rectangular bump*

Sebelum membahas analisa aliran *backward facing step* dengan penambahan *stagger rectangular bump* terlebih dahulu akan dibahas fenomena yang terjadi pada aliran *backward facing step* tanpa *bump*. Fenomena aliran *backward facing step* tanpa *bump* ini akan ditampilkan dengan beberapa data yang nantinya akan menjadi pembanding pada benda uji *backward facing step* dengan penambahan *bump*. Data kualitatif akan ditampilkan berupa visualisasi aliran yang terjadi pada aliran yang mengalir pada pemodelan *backward facing step*. Kemudian data kuantitatif yang akan ditampilkan berupa grafik profil kecepatan, distribusi *skin friction* (C_f), dan distribusi *pressure coefficient* (C_p).



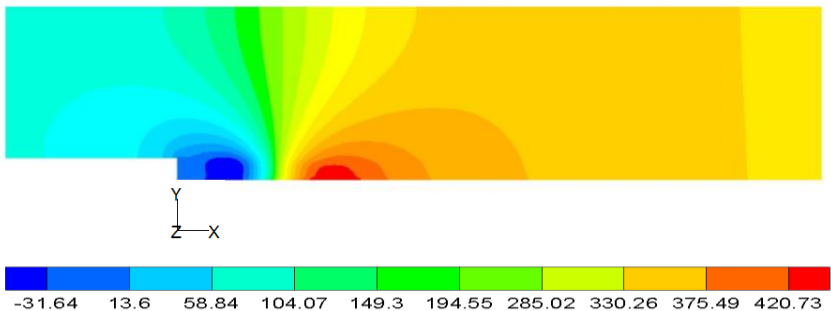
Gambar 4.1 Visualisasi kontur kecepatan pada saluran *backward facing step*

Gambar 4.1 merupakan tampilan kontur kecepatan dari pemodelan geometri *backward facing step* tanpa *bump*. *Grade* warna merah menunjukkan kecepatan maksimum yang melintasi saluran *backward facing step* dan warna biru merupakan kecepatan minimum. Harga kecepatan maksimum yang ditunjukkan oleh gambar 4.1 adalah sebesar 45 m/s dan kecepatan minimumnya adalah 0 yang terdapat pada area didekat *facing step* bagian bawah. Area yang berwarna biru menginformasikan bahwa terjadinya separasi. Separasi ini merupakan kerugian energi. Aliran akan kembali pulih setelah terjadi transfer energi antara aliran yang berada pada daerah yang tidak terseparasi menuju daerah separasi. Pulihnya aliran ini ditandai dengan telah positifnya seluruh nilai profil kecepatan. Titik awal positifnya nilai profil kecepatan sering disebut sebagai titik *reattachment*. Jarak titik *reattachment* yang terjadi pada pemodelan geometri *backward facing step* tanpa *bump* adalah pada $x/h = 5.512$. Jarak ini diukur mulai dari *step* hingga telah positifnya semua nilai profil kecepatan. Dapat dilihat gambar yang terdapat dibawah ini.



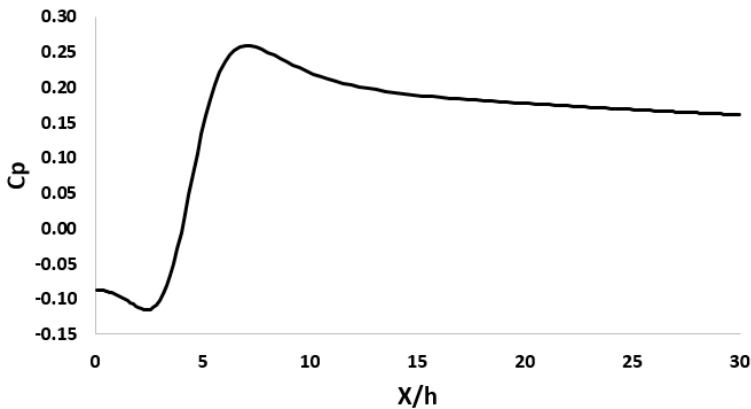
Gambar 4.2 Titik *Reattachment*

Gambar 4.2 menunjukkan vektor kecepatan pada pemodelan *backward facing step*. Tanda lingkaran merah memperlihatkan aliran mengalami *reattachment*. Titik *reattachment* merupakan awal *boundary layer* akan terbentuk kembali, ditandai dengan profil aliran tidak lagi bernilai negatif. Visualisasi aliran yang berwarna merah merupakan aliran dengan kecepatan *freestream*, sedangkan daerah yang berada dibawah garis hitam putus-putus merupakan daerah resirkulasi aliran, ditandai dengan arah vektor kecepatan yang bernilai negatif. Hal ini menandakan adanya pusaran aliran dengan kecepatan rendah.



Gambar 4.3 Visualisasi kontur tekanan statis

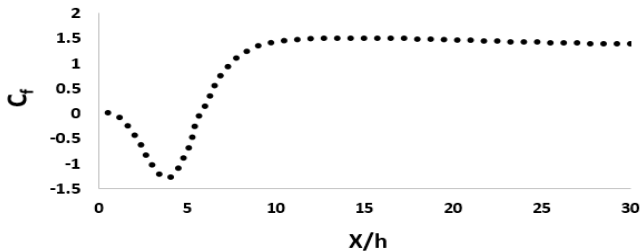
Gambar 4.3 merupakan visualisasi dari kontur tekanan pada *backward facing step*. Visualisasi kontur tekanan statis dapat memberikan informasi mengenai perubahan nilai *pressure coefficient* (C_p) pada pemodelan geometri *backward facing step* yang ditandai dengan *grade* warna yang terbentuk. Terlihat bahwa area setelah *step* mengalami penurunan tekanan yang ditandai dengan warna biru. Kemudian distribusi tekanan mengalami peningkatan searah x yang ditandai dengan perubahan warna yang ditunjukkan dengan warna merah. Berikut ini merupakan grafik distribusi tekanan yang terjadi pada daerah *downstream*.



Gambar 4.4 Grafik *coefficient pressure* (C_p) pemodelan tanpa *bump*

Gambar 4.4 merupakan grafik *coefficient pressure* (C_p) pemodelan tanpa *bump* pada *lower wall* yang ditampilkan untuk memperjelas hasil visualisasi kontur tekanan pada bagian *downstream*. Perubahan luasan penampang mempengaruhi

kecepatan dan tekanan yang terjadi pada penampang *backward facing step*. Kecepatan yang mengalami penurunan pada daerah *diverging area* menyebabkan *pressure drop*. Seperti pada grafik C_p yang berada diatas, C_p bernilai negatif pada titik $x/h = 0$ sampai $x/h = 4$ menandakan bahwa tekanan berada dibawah tekanan *inlet* yaitu dibawah 109 Pa. Nilai C_p minimum ini ditunjukkan dengan kontur tekanan statik berwarna biru yang harganya sebesar -31.64 Pa. Nilai C_p nol menandakan nilai tekanan statis sama dengan tekanan *freestream* di *inlet*. Nilai C_p bernilai maksimum 0.2587 pada $x/h = 7$ dapat dilihat pada gambar 4.3 yang ditampilkan dengan warna merah. Adapun grafik mengalami penurunan dari $x/h = 0$ sampai $x/h = 2.4$, ini menandakan terjadinya percepatan aliran pada permukaan dinding bagian *downstream*. Besarnya *pressure drop* yang terjadi pada pemodelan geometri *backward facing step* tanpa menggunakan *bump* adalah 215 762 Pa



Gambar 4.5 Grafik *coefficient friction* (C_f) pemodelan tanpa *bump*

Gambar 4.5 menunjukan distribusi *skin friction* yang terjadi sepanjang *lower wall* pada daerah *downstream*. Terlihat grafik mengalami penurunan kemudian mengalami kenaikan dan setelah itu konstan. Nilai C_f yang bernilai negatif dimulai dari $x/h = 0$ sampai $x/h = 5.423$, menandakan aliran mengalami separasi. Adapun nilai $C_f = 0$ pada $x/h = 5.423$ menunjukan titik *reattachment* aliran, karena daerah *lower wall* pada titik $x/h =$

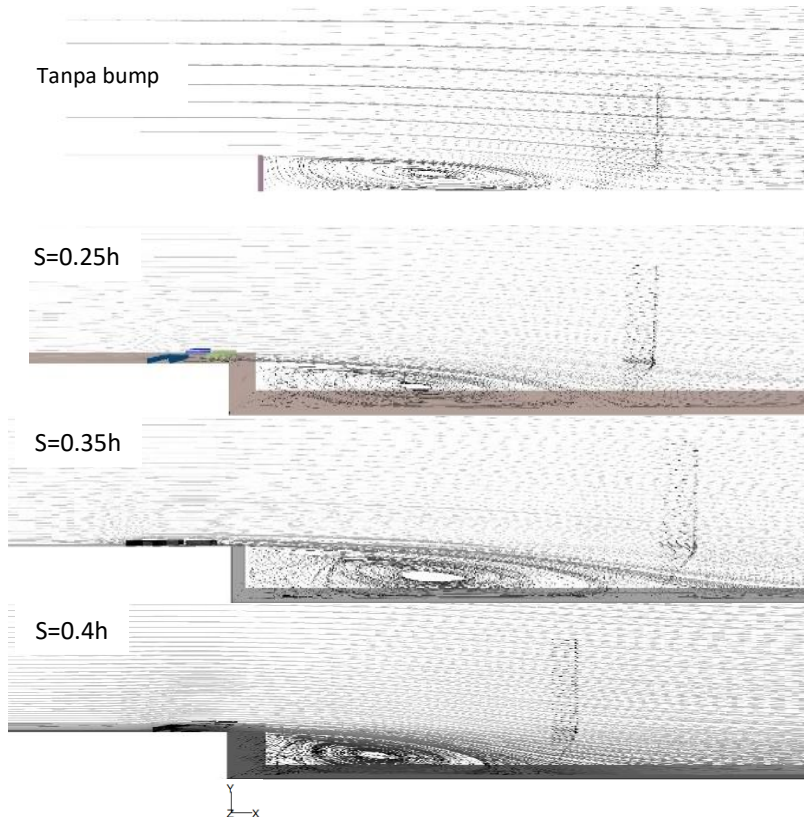
5.423 memiliki kecepatan nol, ketika nilai C_f bernilai nol tidak terjadi tegangan geser pada dinding maka nilainya juga nol.

Dari beberapa data *backward facing step* yang didapatkan tadi dapat disimpulkan bahwa *diverging area* menyebabkan separasi aliran. Separasi aliran ini diakibatkan oleh aliran yang tidak mampu melawan *adverse pressure gradient* yang terjadi pada daerah *diverging area*. Penambahan bodi pengganggu pada posisi *upstream* berupa *rectangular bump* diharapkan dapat meningkatkan intensitas turbulensi aliran, meningkatnya intensitas turbulensi berarti meningkatkan momentum aliran yang mengalir pada penampang *backward facing step* sehingga luas daerah separasi atau panjang titik *reattachment*nya dapat direduksi.

4.2 Analisa aliran *backward facing step* tanpa dan dengan penambahan *bump*

4.2.1 Panjang *Reattachment*

Dari hasil simulasi yang dilakukan dengan memvariasikan jarak pada *rectangular bump*, kemudian dibandingkan dengan pemodelan benda uji tanpa *bump* didapatkan hasil berupa panjang *reattachment* yang bisa dilihat pada gambar 4.6. Gambar 4.6 menunjukkan bahwa terdapat perbedaan panjang *reattachment* dari setiap aliran walaupun perbedaan tersebut tidak terlalu signifikan. Dari penelitian ini yang akan dianalisa adalah panjangnya titik *reattachment* dari tiap-tiap pemodelan benda uji pada posisi $Z = 0$, 0.0254, dan 0.0508 dimana posisi 0 dihitung dari *symetri wall* sebagai akibat dari pengaruh variasi jarak pengganggu berupa *rectangular bump* yang disusun secara *stagger* pada bagian *downstream*.



Gambar 4.6 Resirkulasi aliran tanpa menggunakan *bump* dan dengan variasi jarak *bump* pada posisi $Z = 0$

Jika dilihat sekilas, gambar 4.6 memperlihatkan panjang *reattachment* yang hampir sama. Variasi jarak *bump* yang semakin ke arah *step* juga mempengaruhi peningkatan kecepatan aliran pada puncak *rectangular bump*. Pada jarak variasi *bump* $s = 0.25 h$ pada posisi $Z = 0$, aliran memiliki kecepatan maksimum sebesar 49.69 m/s. Aliran terlebih dahulu terseparasi akibat melewati *rectangular bump*. Jarak separasi yang sangat dekat dengan *step* memberikan pengaruh pada separasi yang terjadi selanjutnya pada bagian *downstream*. Hal ini dipengaruhi oleh belum stabilnya aliran akibat

separasi yang terjadi pada saat melewati *rectangular bump* langsung melewati perbedaan penampang. Simulasi jarak *bump* yang lain dengan $s = 0.35h$, dan $0.4h$ terletak agak jauh dari *step* sehingga memberi ruangan untuk terjadinya *reattachment* ketika melewati *rectangular bump*. Panjang *reattachment* dan panjang reduksi yang dihasilkan dari tiap-tiap variasi dapat dilihat pada tabel 4.1.

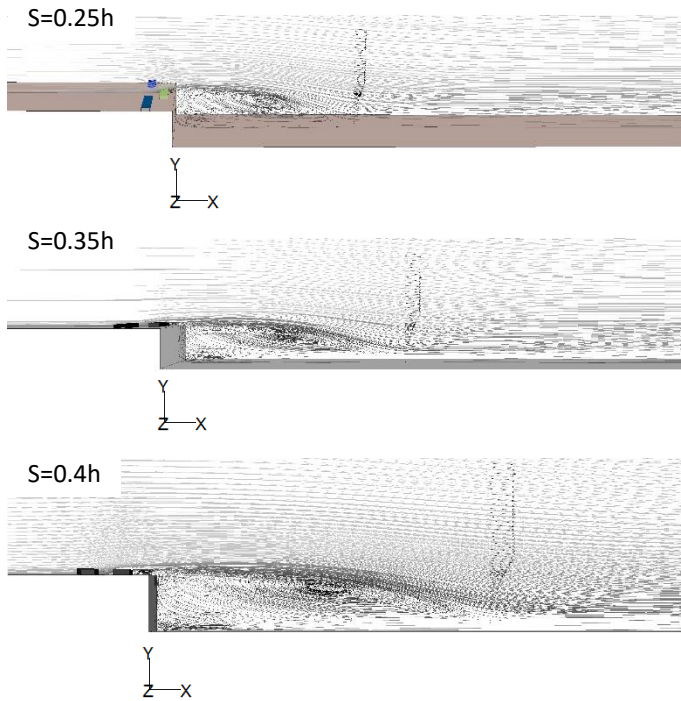
Tabel 4.1 Perbandingan jarak *reattachment* pada posisi $Z=0$

Variasi s/h	Y^+	panjang <i>reattachment</i>	Tanpa Bump
0.25	264.42	5.04	5.51
0.35	264.13	5.35	
0.40	254.06	5.4	

Hasil rekayasa pemodelan yang dilakukan dengan menggunakan $Re\ 3.8 \times 10^4$ memperlihatkan bahwa pada jarak *bump* $s = 0.25h$ terjadi pengurangan panjang *reattachment* sebesar 8.52 %. Pada jarak *bump* $s = 0.35h$ terjadi pengurangan panjang *reattachment* sebesar 2.9 %. Pada jarak *bump* $s = 0.4h$ terjadi pengurangan panjang *reattachment* sebesar 2 %.

Hasil yang paling efektif untuk mengurangi panjang *reattachment* pada posisi $Z=0$ pada simulasi yang dilakukan adalah pada jarak *bump* $s = 0.25h$ dimana persentase pengurangan jarak *reattachment* sebesar 8.52%.

Pada Gambar 4.7 menunjukan bahwa terdapat perbedaan panjang *reattachment* dari setiap aliran. Dari penelitian ini yang akan dianalisa adalah panjangnya titik *reattachment* dari tiap-tiap pemodelan benda uji pada posisi $Z = 0.0254$, sebagai akibat dari pengaruh variasi jarak pengganggu berupa *rectangular bump* yang disusun secara *stagger* pada bagian *downstream*.



Gambar 4.7 Resirkulasi aliran variasi jarak *bump* pada posisi $Z = 0.0254$

Gambar 4.7 memperlihatkan panjang *reattachment* yang berbeda-beda pada setiap variasi jarak. Variasi jarak *bump* yang semakin kearah *step* juga mempengaruhi peningkatan kecepatan aliran pada puncak *rectangular bump*. Pada jarak variasi *bump* $s = 0.25 h$ pada posisi $Z = 0$ aliran memiliki kecepatan maksimum sebesar 49.69 m/s. Aliran terlebih dahulu terseparasi akibat melewati *rectangular bump*.

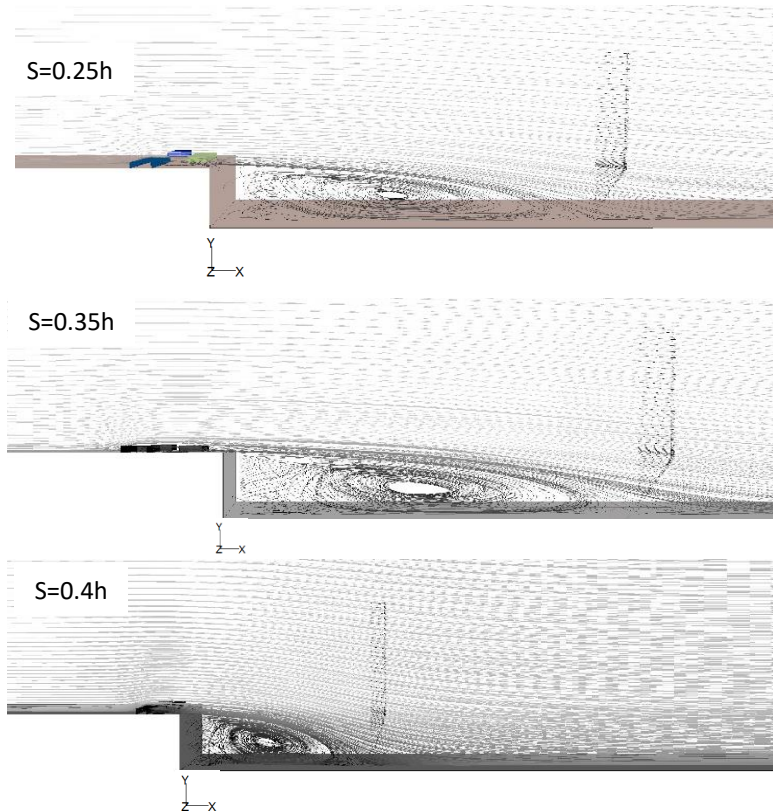
Panjang *reattachment* dan panjang reduksi yang dihasilkan dari tiap-tiap variasi dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Perbandingan jarak *reattachment* pada posisi $Z = 0.0254$

Variasi s/h	Y^+	panjang <i>reattachment</i>	Tanpa Bump
0.25	264.42	6.98	5.51
0.35	264.13	6.53	
0.40	254.06	6.01	

Tabel 4.2 memperlihatkan bahwa pada jarak *bump* $s = 0.25h$, $0.35h$ dan $0.4h$ tidak terjadi pengurangan panjang *reattachment*. Pada jarak *bump* $s = 0.25h$ terjadi penambahan panjang *reattachment* sebesar 26.67%, pada jarak *bump* $s = 0.35h$ terjadi penambahan panjang *reattachment* sebesar 18.51%, dan pada jarak *bump* $s = 0.4h$ terjadi penambahan panjang *reattachment* sebesar 9.07%,

Pada Gambar 4.8 menunjukkan bahwa terdapat perbedaan panjang *reattachment* dari setiap aliran. Dari penelitian ini yang akan dianalisa adalah panjangnya titik *reattachment* dari tiap-tiap pemodelan benda uji pada posisi $Z = 0.0508$, sebagai akibat dari pengaruh variasi jarak pengganggu berupa *rectangular bump* yang disusun secara *stagger* pada bagian *downstream*.



Gambar 4.8 Resirkulasi aliran variasi jarak *bump* pada posisi $Z = 0.0508$

Gambar 4.8 memperlihatkan panjang *reattachment* yang berbeda-beda pada setiap variasi jarak. Variasi jarak *bump* yang semakin kearah *step* juga mempengaruhi peningkatan kecepatan aliran pada puncak *rectangular bump*. Pada jarak variasi *bump* $s = 0.25 h$ pada posisi $Z = 0.0508$, aliran memiliki kecepatan maksimum sebesar 49.69 m/s. Aliran terlebih dahulu terseparasi akibat melewati *rectangular bump*.

Panjang *reattachment* dan panjang reduksi yang dihasilkan dari tiap-tiap variasi dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Perbandingan jarak *reattachment* pada posisi $Z=0.0508$

Variasi s/h	Y^+	panjang <i>reattachment</i>	Tanpa Bump
0.25	264.42	4.72	5.51
0.35	264.13	5.11	
0.40	254.06	5.51	

Hasil rekayasa pemodelan yang dilakukan dengan menggunakan $Re\ 3.8 \times 10^4$ memperlihatkan bahwa pada jarak *bump* $s=0.25h$, dan $0.35h$ terjadi pengurangan panjang *reattachment* berturut-turut sebesar 14.31 %, dan 7.26% . Pada jarak *bump* $s=0.4h$ tidak terjadi pengurangan dan penambahan panjang *reattachment*.

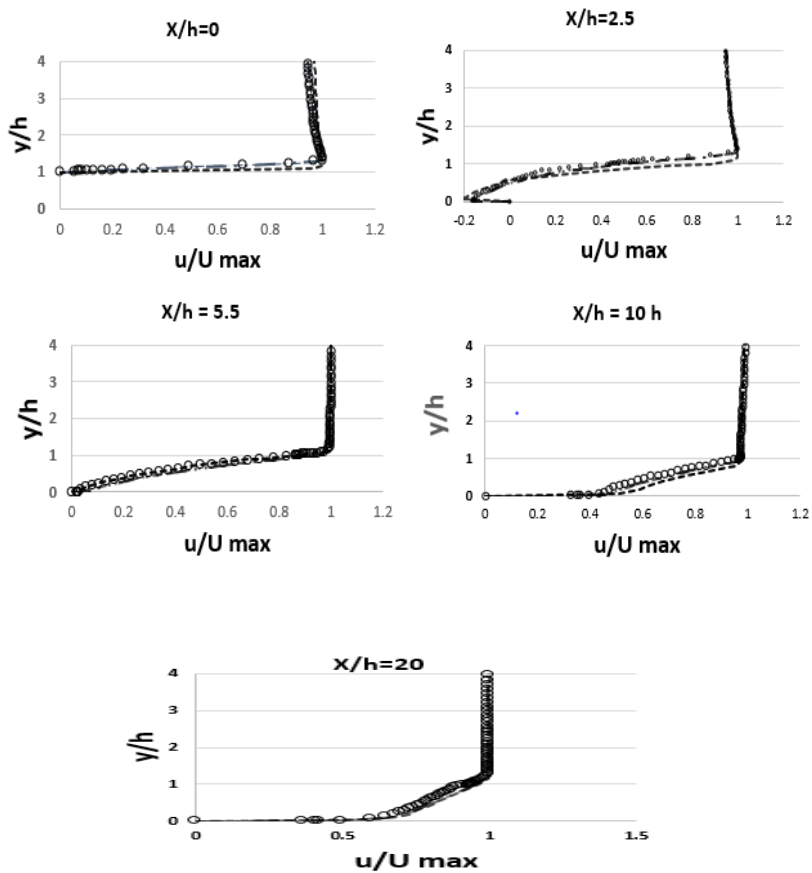
Hasil yang paling efektif untuk mengurangi panjang *reattachment* pada posisi $Z=0.0508$ pada simulasi yang dilakukan adalah pada jarak *bump* $s=0.35h$ dimana persentase pengurangan jarak *reattachment* sebesar 14.31%.

4.2.2 Distribusi Profil Kecepatan

Penurunan nilai kecepatan seiring dengan perubahan jarak dalam suatu pemodelan *backward facing step* dikarenakan bentuk geometri yang mengembang secara tiba-tiba, sehingga mengakibatkan aliran balik (*back flow*). Penambahan *bump* bertujuan untuk mengganggu aliran yang melewati penampang *backward facing step*, terganggunya aliran diharapkan dapat meningkatkan intensitas turbulensi aliran sehingga dapat meningkatkan momentum aliran. Momentum aliran yang nantinya akan mempengaruhi panjang *reattachment*. Profil kecepatan yang akan dibahas lebih kepada bagian *downstream* pemodelan. Berikut adalah gambar profil kecepatan pada *cross section* $x=0h, 2.5h, 5.5h, 10h$, dan $20h$.

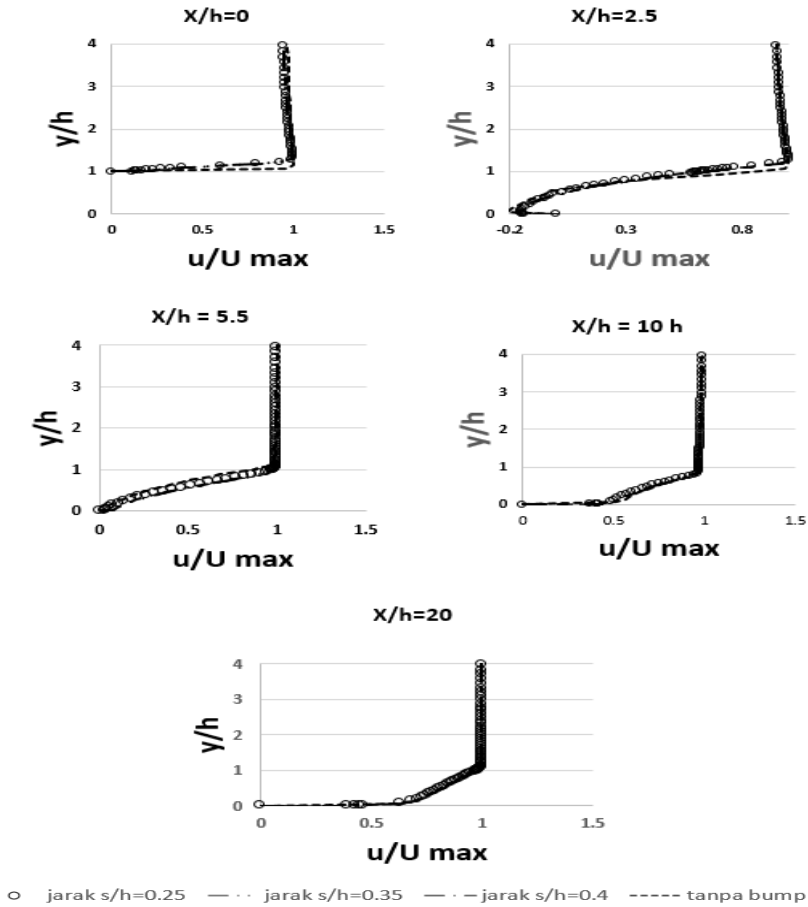
Gambar 4.9, 4.10, dan 4.11 masing-masing menunjukkan perubahan profil kecepatan dari tiap-tiap *cross section* yang telah ditentukan pada posisi $Z=0$, 0.0254 dan 0.0508. Adanya profil kecepatan dapat memperlihatkan daerah yang terseparasi pada *cross section* yang telah ditentukan. Profil kecepatan disajikan dalam bentuk grafik tak berdimensi (y/h) dan fungsi kecepatan tak berdimensi (u/U_{max}) pada jarak yang tak berdimensi. u/U_{max} merupakan perbandingan antara setiap kecepatan lokal pada sebuah *cross section* x/h dengan nilai U_{max} pada *cross section* tersebut.

Aliran yang mengalir pada sisi *upstream* pemodelan geometri akan mengalami penebalan *boundary layer* sampai pada posisi *cross section* $x=0h$ (disaat posisi *step*). Aliran pada pemodelan tanpa *bump* memperlihatkan profil kecepatan sudah berkembang namun pada pemodelan dengan menggunakan *bump* profil kecepatan memperlihatkan belum terjadi perkembangan aliran. Hal ini disebabkan oleh penambahan pengganggu berupa *bump*, sehingga aliran mengalami ketidak stabilan dan menyebabkan profil kecepatan belum berkembang penuh.

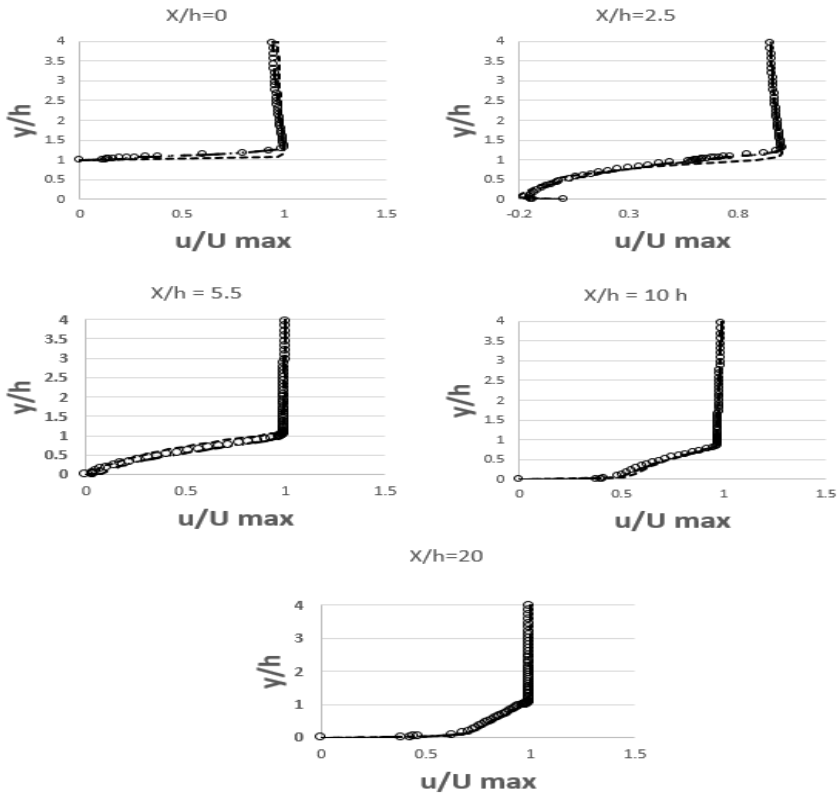


○ jarak $s/h=0.25$ — · · jarak $s/h=0.35$ — · — jarak $s/h=0.4$ ----- tanpa bump

Gambar 4.9 Perbandingan profil kecepatan pada beberapa *cross section* x/h , model *backward facing step* tanpa dan dengan penambahan *bump* pada posisi $z=0$



Gambar 4.10 Perbandingan profil kecepatan pada beberapa *cross section* x/h , model *backward facing step* tanpa dan dengan penambahan *bump* pada posisi $z = 0.0254$



○ jarak $s/h=0.25$ ··· jarak $s/h=0.35$ — · — jarak $s/h=0.4$ ----- tanpa bump

Gambar 4.11 Perbandingan profil kecepatan pada beberapa *cross section* x/h , model *backward facing step* tanpa dan dengan penambahan *bump* pada posisi $z = 0.0508$

Pada gambar 4.9, 4.10, dan 4.11 distribusi profil kecepatan yang ditunjukkan pada *cross section* $x = 2.5h$ memperlihatkan grafik terjadinya separasi yang ditandai dengan nilai negatif. Separasi

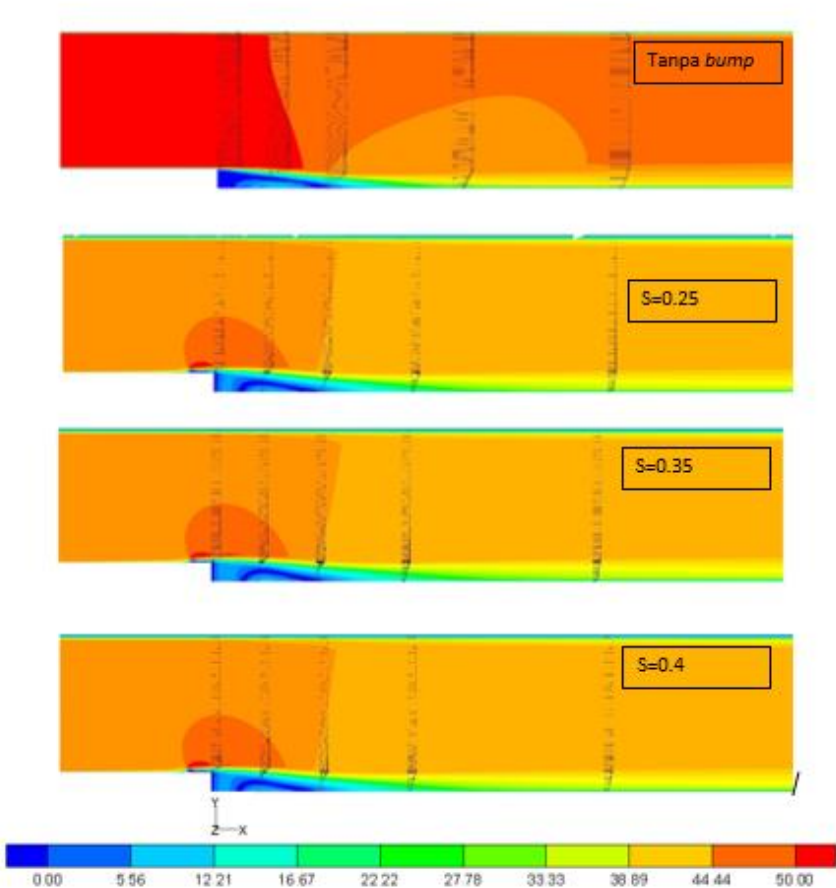
disebabkan oleh tidak mempunya momentum aliran melawan *adverse pressure gradient* dan tegangan geser yang terjadi pada bentuk penampang yang mengalami pelebaran secara tiba-tiba. Aliran akan kembali pulih pada posisi tertentu setelah terjadi transfer energi antara aliran yang berada didaerah yang tidak terseparasi menuju aliran yang berada didaerah terseparasi.

Distribusi profil kecepatan pada *cross section* $x = 5.5h$ memperlihatkan distribusi profil kecepatan semua aliran pada posisi $Z = 0$ dan 0.0508 sudah bernilai positif. Namun pada profil kecepatan pemodelan geometri jarak *bump* pada posisi $Z = 0.0254$ masih terdapat aliran yang memiliki nilai negatif. Hal ini menandakan aliran pada posisi $Z = 0.0254$ belum melewati titik *reattachment*. *Cross section* $x = 10h$ memperlihatkan distribusi profil kecepatan semua aliran sudah bernilai positif. Aliran pada *cross section* $x = 10h$ sudah mulai berkembang disebabkan telah hilangnya pengaruh separasi yang terjadi. Distribusi profil kecepatan pada *cross section* $x = 20h$ sudah memperlihatkan aliran berkembang penuh.

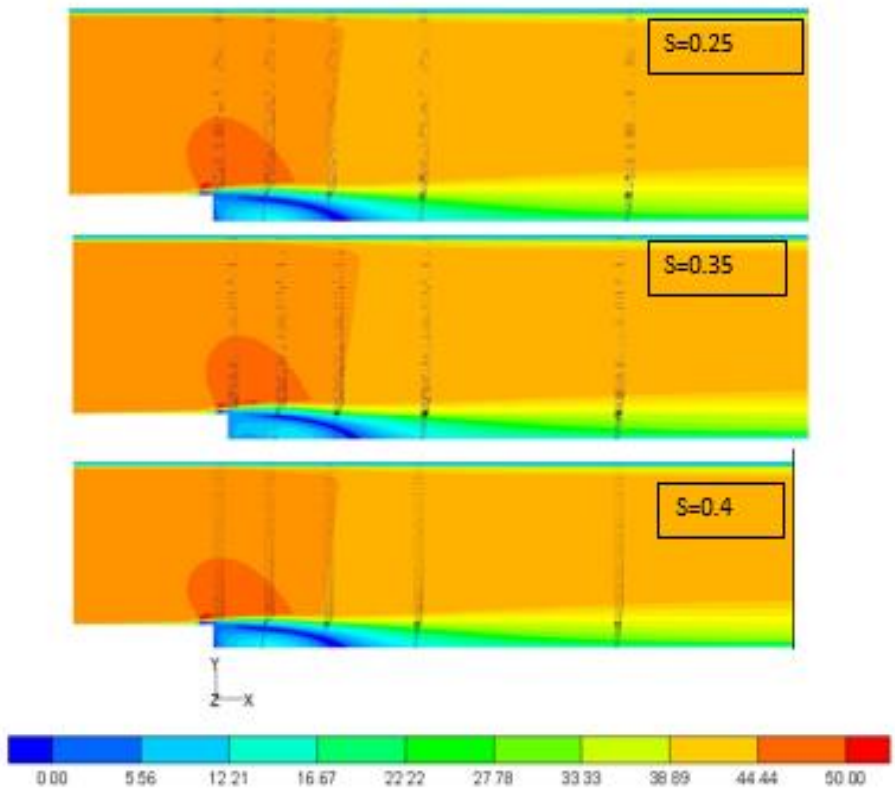
Fenomena aliran yang terjadi didalam pemodelan *backward facing step* secara detail juga dapat divisualisasikan dengan metode numerik berupa tampilan kontur kecepatan, vektor kecepatan dan visualisasi aliran 3D . Gambar distribusi kecepatan yang ditampilkan merupakan perpotongan dari bidang potong sumbu z serta data vektor kecepatan yang diambil pada bagian sepanjang *cross section*.

Fenomena aliran melewati pemodelan dapat dibedakan dengan membaca rentang warna yang tertera dibawah pemodelan benda uji. Posisi *inlet* bagian tengah berwarna kuning menandakan kecepatan *freestream*. Warna merah menandakan terjadi kenaikan kecepatan. Pada daerah *diverging*, terjadi penurunan kecepatan yang ditandai dengan warna biru berkisar rentang 0 sampai 12. Kontur kecepatan berwarna biru memberitahukan bahwa aliran mengalami separasi. Visualisasi kontur kecepatan ini

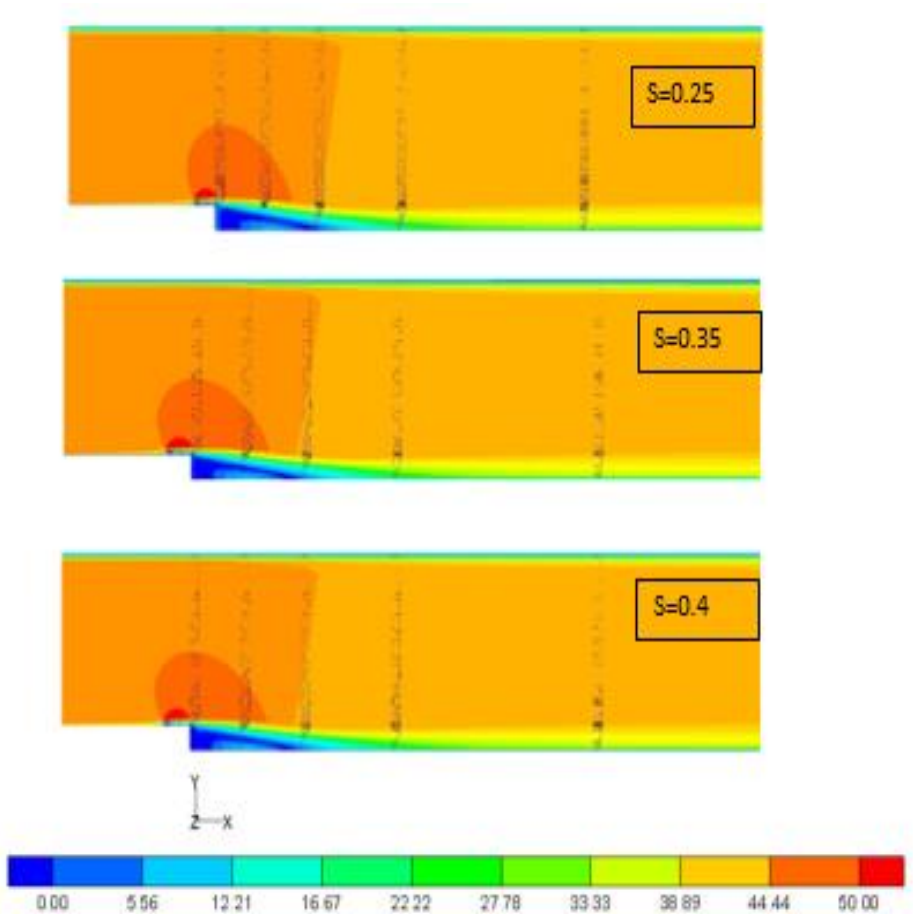
menginformasikan tingkat kecepatan aliran yang mengalir pada penampang *backward facing step* dan besar luasan separasi yang terjadi pada penampang.



Gambar 4.12 Visualisasi kontur kecepatan model *backward facing step* dengan penambahan pengganggu *bump* pada posisi $Z = 0$

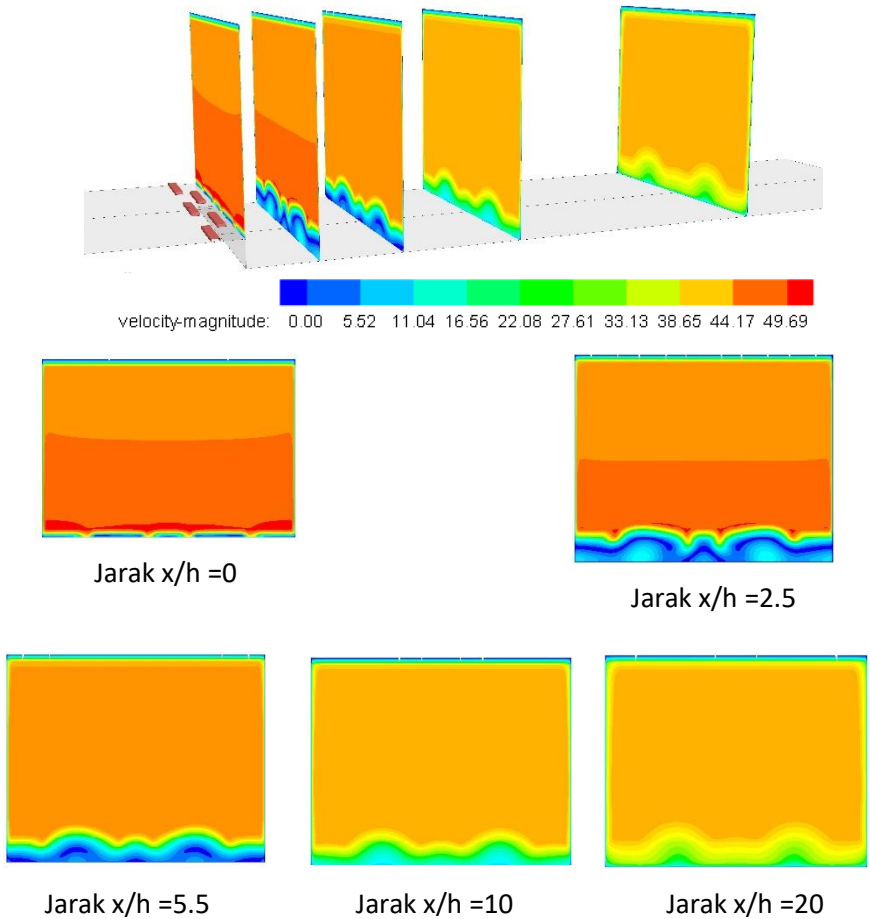


Gambar 4.13 Visualisasi kontur kecepatan model *backward facing step* dengan penambahan pengganggu *bump* pada posisi $Z = 0.0254$



Gambar 4.14 Visualisasi kontur kecepatan model *backward facing step* dengan penambahan pengganggu *bump* pada posisi $Z = 0.0508$

Visualisasi aliran 3D kontur velocity magnitude yang ditampilkan pada bidang X dengan jarak $s/h = 0.25$ dapat ditampilkan sebagai berikut :



Gambar 4.15 Visualisasi aliran 3D kontur velocity magnitude

Dari hasil simulasi yang dilakukan dengan memvariasikan jarak *stagger rectangular bump* didapatkan hasil berupa resirkulasi aliran dan vortex yang menyebabkan adanya aliran balik atau *back flow* yang mengganggu aliran utama yang tampak pada sumbu XZ yang bisa dilihat pada gambar 4.6. Gambar 4.6 ,menunjukkan dengan adanya *obstacle* pada aliran turbulen memberikan peningkatan *turbulence intensity* (Tu). Meningkatnya *turbulence intensity* diharapkan memberikan pengaruh pada aliran setelah melewati *obstacle* menjadi lebih turbulen, sehingga aliran yang terseparasi pada *facing step* memiliki lokasi *reattachment* lebih pendek pada daerah *downstream*.

4.2.3 Distribusi Intensitas Turbulensi

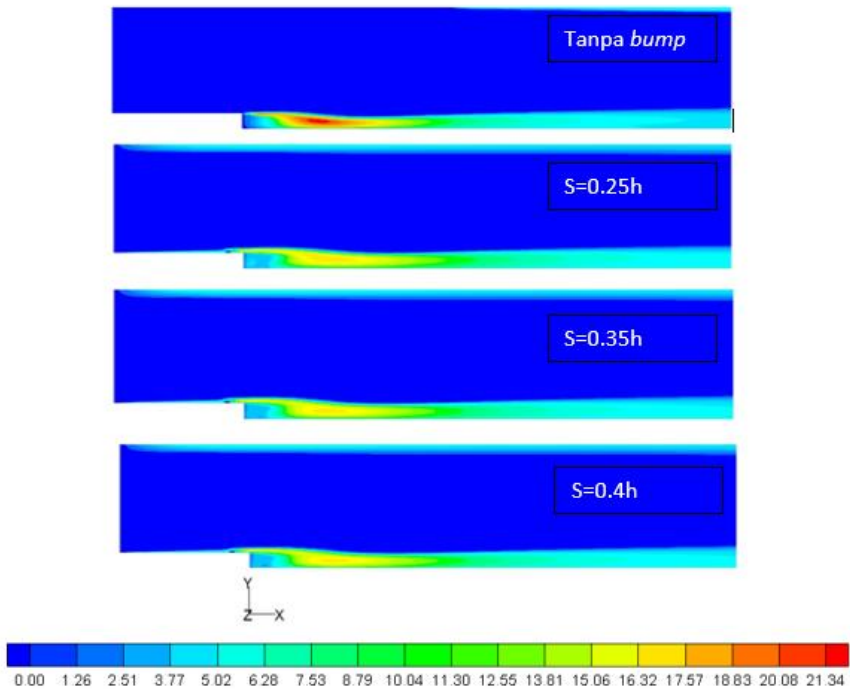
Intensitas turbulensi adalah bilangan tak berdimensi yang dipengaruhi oleh standar deviasi kecepatan aliran dan kecepatan rata-rata fluida. Intensitas turbulensi merupakan suatu skala yang disajikan dalam persentase tersusun atas tiga kecepatan arah aliran yaitu kecepatan aliran kearah aksial, radial, dan tangensial. Apabila nilai standar deviasi kecepatan aliran semakin besar maka intensitas turbulensi semakin besar, dan sebaliknya apabila kecepatan rata-rata fluida semakin besar, nilai intensitas turbulensi yang terjadi akan semakin kecil.

Penambahan *rectangular bump* pada sisi *upstream* yang disusun secara *staggered* dapat meningkatkan intensitas turbulensi. Meningkatnya intensitas turbulensi akan meningkatkan momentum aliran. Meningkatnya momentum aliran diharapkan dapat melawan *adverse pressure gradient* dan tegangan geser yang terjadi pada penampang *backward facing step*.

Visualisasi kontur intensitas turbulensi dapat memberikan informasi mengenai perubahan nilai intensitas turbulensi yang terjadi pada pemodelan. Intensitas turbulensi ditunjukkan dengan oleh *grade* warna yang terbentuk dari simulasi yang dilakukan.

Gambar 4.15, menunjukan visualisasi intensitas turbulensi yang terjadi dari tiap-tiap pemodelan *backward facing step* pada jarak $s/h=0.25, 0.35, \text{ dan } 0.4$. Visualisasi kontur intensitas turbulensi dapat memberikan informasi mengenai perubahan nilai intensitas turbulensi yang terjadi pada pemodelan *backward facing step* yang ditunjukkan dengan perbedaan *grade* warna. Penambahan pengganggu berupa *bump* akan menyebabkan intensitas turbulensi semakin meningkat. Seiring meningkatnya intensitas turbulensi maka semakin meningkat pula momentum aliran pada dinding pemodelan geometri. Harapannya dengan semakin meningkatnya momentum aliran, aliran akan mampu melawan *adverse pressure gradient* dan tegangan geser yang terjadi, sehingga separasi dapat diminimalisir.

Turbulensi aliran merupakan salah satu sifat fluida yang menunjukkan fluktuasi aliran, dimana gambar 4.16 visualisasi kontur intensitas turbulensi ini menunjukan seberapa besar tingkat intensitas turbulensi yang terjadi pada pemodelan. Pada pemodelan *backward facing step* tanpa menggunakan *bump* terlihat bahwa tingkat intensitas turbulensi maksimalnya adalah 18.96. Pada pemodelan dengan variasi jarak *bump* $s = 0.25h$ memperlihatkan tingkat intensitas turbulensi maksimumnya adalah 21.30 pada posisi $Z = 0, 0.0254 \text{ dan } 0.0508$. Kemudian untuk variasi jarak $s = 0.35$ memperlihatkan tingkat intensitas turbulensi maksimumnya adalah 21.34 pada posisi $Z = 0, 0.0254, \text{ dan } 0.0508$. Pada variasi jarak $s = 0.4h$ memperlihatkan tingkat intensitas turbulensi yang semakin kecil dengan nilai maksimum 21.10 pada posisi $Z = 0, 0.0254 \text{ dan } 0.0508$. Karena nilai maksimum intensitas turbulensi sama untuk semua posisi Z pada jarak *bump* $0.25h, 0.35h, \text{ dan } 0.4h$ maka gambar 4.15 hanya akan menampilkan visualisasi kontur intensitas turbulensi pada posisi $Z=0$.



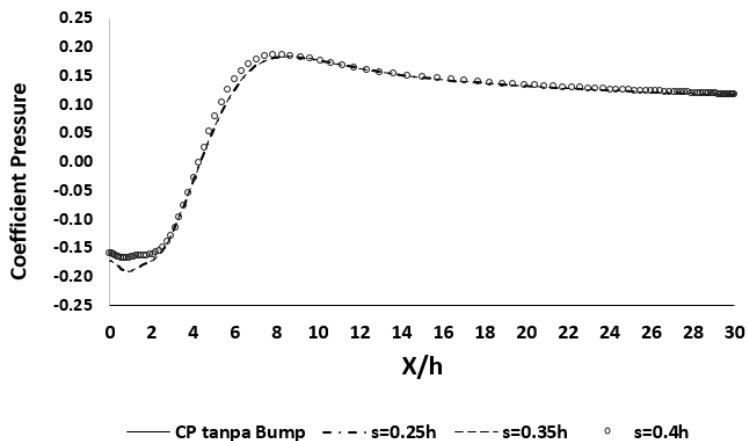
Gambar 4.16 Visualisasi kontur intensitas turbulensi tanpa dan dengan penambahan *bump*

Dari hasil visualisasi dapat diketahui bahwa yang memiliki nilai intensitas turbulensi yang paling besar adalah variasi jarak $s=0.35h$, sedangkan yang memiliki nilai intensitas turbulensi paling kecil dari penambahan *rectangular bump* yang disusun *staggered* terdapat pada pemodelan geometri dengan jarak $s=0.4h$.

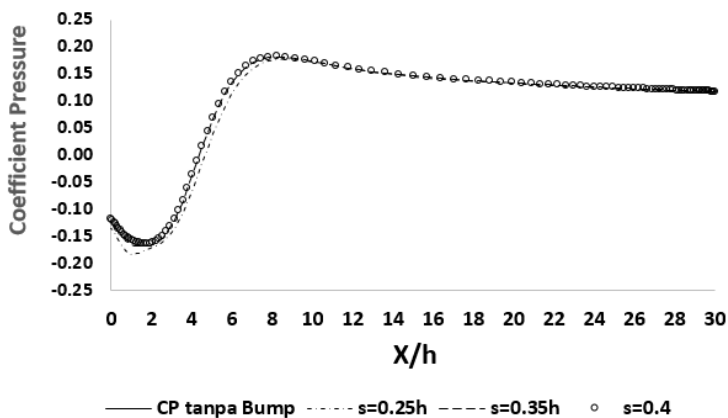
4.2.4 Coefficient of Pressure (Cp)

Pressure coefficient merupakan salah satu bilangan tak berdimensi yang dapat mempresentasikan aliran didalam pipa. Data koefisien tekan diambil pada bagian *downstream* pemodelan geometri *backward facing step*. Aliran pada mulanya akan mengalami percepatan yang ditandai dengan penurunan grafik akibat *favorable pressure gradient*. Setelah itu mengalami perlambatan yang ditandai dengan kenaikan sangat tajam diakibatkan oleh aliran yang tidak mampu melawan *adverse pressure gradient* pada saat penampang mengembang dengan tiba-tiba sehingga aliran terseparasi. Separasi akan berangsur normal dan akhirnya akan hilang, ini disebabkan karena adanya transfer energi antara aliran yang berada didaerah yang tidak terseparasi menuju aliran yang berada didaerah terseparasi sehingga aliran yang terseparasi akan berangsur-angsur kembali normal.

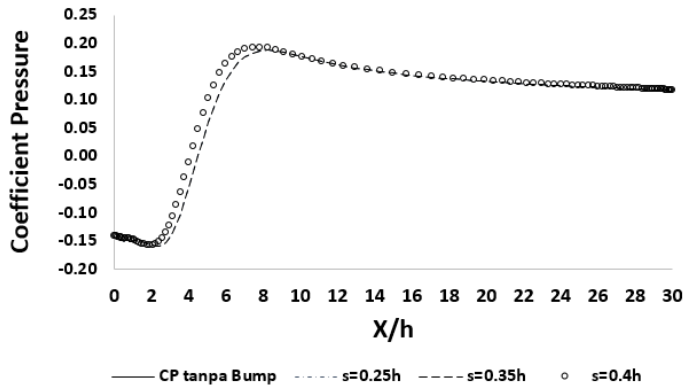
Pada gambar 4.17 grafik perbandingan Cp tanpa *bump* dan dengan penambahan *bump* dibawah dapat dilihat bahwa nilai koefisien tekan yang didapatkan dari simulasi ini memiliki tren yang sama, namun memiliki nilai yang berbeda-beda. Tekanan statis mengalami penurunan kemudian mengalami kenaikan yang sangat tajam yang diakibatkan aliran yang mengembang dengan tiba-tiba, sehingga terjadi *adverse pressure gradient* yang membuat aliran terseparasi. Penambahan *stagger rectangular bump* pada sisi *upstream* bertujuan untuk meningkatkan intensitas turbulensi pada aliran. Akibat meningkatnya intensitas turbulensi, momentum aliran yang berada pada dinding akan mengalami peningkatan. Momentum aliran yang lebih tinggi ini diharapkan mampu untuk melawan *adverse pressure gradient* pada penampang yang melebar secara tiba-tiba, sehingga separasi yang terjadi dapat ditunda. Aliran akan kembali normal setelah terjadi transfer energi antara aliran yang terseparasi dengan aliran yang tidak terseparasi.



Gambar 4.17 Perbandingan grafik C_p tanpa *bump* dan dengan menggunakan *bump* pada posisi $Z=0$



Gambar 4.18 Perbandingan grafik C_p tanpa *bump* dan dengan menggunakan *bump* pada posisi $Z=0.0254$



Gambar 4.19 Perbandingan grafik C_p tanpa *bump* dan dengan menggunakan *bump* pada posisi $Z=0.0508$

Hasil simulasi yang dilakukan menunjukkan bahwa dengan penambahan *stagger rectangular bump* pada posisi *upstream* dapat menurunkan *pressure drop* yang terjadi pada pemodelan geometri *backward facing step*.

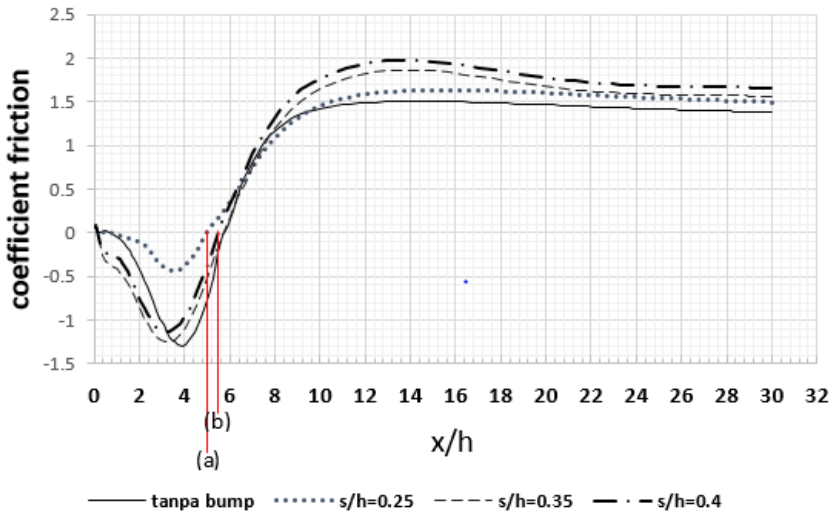
Tabel 4.1 merupakan hasil perbandingan *pressure drop* yang didapat dari selisih Tekanan pada sisi inlet (P_1) yang diukur pada jarak $x/h = 2$ dan tekanan pada sisi outlet (P_2) yang diukur setelah titik *reattachment* pada jarak $x/h=20$ pada tiap-tiap pemodelan. Nilai (ΔP) yang paling kecil terdapat pada model benda uji $s/h = 0.25$ sebesar 205.340 Pa dan nilai (ΔP) yang paling besar terdapat pada penambahan bodi pengganggu dengan jarak $s/h = 0.4$ sebesar 232.089 Pa.

Tabel 4.2 Perbandingan nilai *pressure drop*.

no	variasi s/h	(P_1) Pa	(P_2) Pa	(ΔP) Pa	K1
1	tanpa bump	80.458	350.256	269.798	0.459
2	0.25	101.743	307.083	205.340	0.405
3	0.35	102.856	325.852	222.996	0.420
4	0.4	103.563	335.652	232.089	0.428

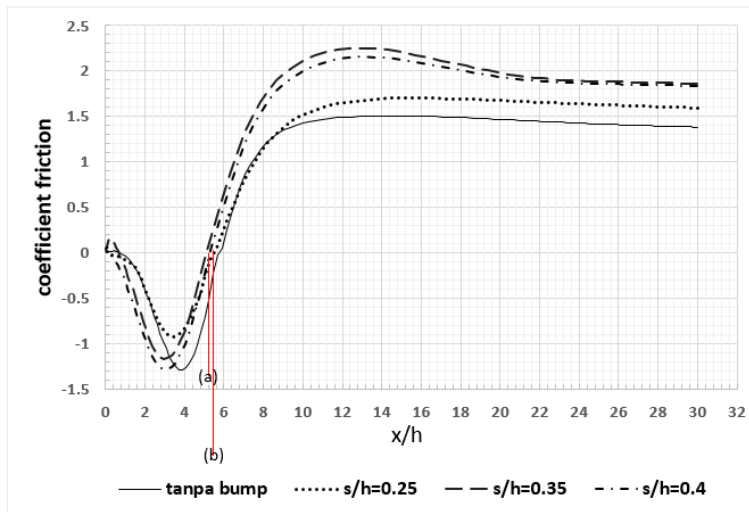
4.2.5 Coefficient Friction (C_f)

Besarnya *skin friction coefficient* (C_f) erat kaitannya dengan besarnya tegangan geser dinding (τ_w). Geometri *backward facing step* identik dengan perubahan penampang yang melebar sehingga aliran yang mengalir didalamnya akan memperoleh pengaruh dari *adverse pressure gradient* yang besar. Turunya nilai C_f dimulai dari nol mengindikasikan terjadinya separasi aliran yang dipengaruhi *adverse pressure gradient* sehingga terjadi penebalan *boundary layer*, akibatnya aliran didekat *diverging wall* akan mengalami defisit momentum sehingga terjadi separasi.



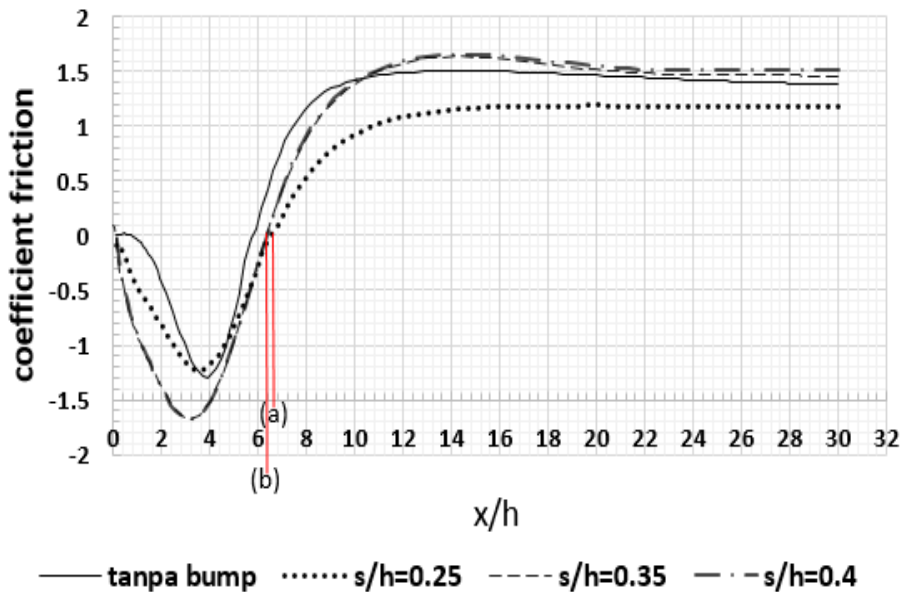
Gambar 4.20 Perbandingan grafik C_f tanpa *bump* dan dengan menggunakan *bump* pada posisi $Z=0$

Pada gambar 4.20 dari grafik C_f didapatkan bahwa nilai panjang reattachment yang paling kecil berada di titik (a) dengan nilainya adalah 5 pada jarak $s/h=0.25$ dan nilai reattachment yang paling besar yaitu pada jarak $s/h = 0.4$ dengan nilainya adalah 5.5.



Gambar 4.21 Perbandingan grafik C_f tanpa *bump* dan dengan menggunakan *bump* pada posisi $Z=0.0254$

Pada gambar 4.21 dari grafik C_f didapatkan bahwa nilai panjang reattachment yang paling besar berada di titik (a) dengan nilainya adalah 6.8 pada jarak $s/h=0.25$ dan nilai reattachment yang paling kecil yaitu pada jarak $s/h=0.4$ dengan nilainya adalah 6.02.



Gambar 4.22 Perbandingan grafik C_f tanpa *bump* dan dengan menggunakan *bump* pada posisi $Z=0.0508$

Pada gambar 4.22 dari grafik C_f didapatkan bahwa nilai panjang reattachment yang paling kecil berada di titik (a) dengan nilainya adalah 4.7 pada jarak $s/h=0.25$ dan nilai reattachment yang paling besar yaitu pada jarak $s/h=0.4$ dengan nilainya adalah 5.5.

Gambar 4.20, gambar 4.21 dan gambar 4.22 menunjukkan distribusi C_f pada *wall* model *backward facing step* dengan *reynolds number* 3.8×10^4 tanpa *bump* dan dengan penambahan *bump* pada bagian *downstream*. Keseluruhan fenomena grafik C_f dari tiap-tiap pemodelan memiliki tren yang relatif sama. Perbandingan pemodelan geometri *backward facing step* yang menggunakan *bump* dan tanpa menggunakan *bump* sama-sama

dimulai dari nilai $C_f = 0$, ini menunjukkan terjadinya separasi aliran pada area *diverging*.

Dari gambar grafik diatas dapat dilihat bahwa apabila ditarik garis dari nilai nol pada koordinat y kearah horizontal maka akan didapatkan panjang *reattachment* dari tiap-tiap pemodelan geometri, dimana pemodelan dengan jarak *bump* yang telah ditentukan pada posisi $Z = 0.0508$ memiliki jarak *reattachment* yang paling pendek, kemudian diikuti dengan pemodelan dengan rectangular bump pada posisi $Z = 0$. Sedangkan pemodelan dengan rectangular bump pada posisi $Z = 0.0254$ memiliki jarak *reattachment* yang paling panjang. Hal ini menunjukkan kesesuaian dengan data hasil yang didapat dari panjang *reattachment* pada tabel 4.1, tabel 4.2 dan tabel 4.3.

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisa yang telah dilakukan mengenai karakteristik aliran didalam *backward facing step* dengan *reynolds number* 3.8×10^4 dan variasi jarak *bump* maka didapatkan beberapa kesimpulan diantaranya :

1. Penambahan *bump* pada bagian sisi *upstream* sangat berpengaruh terhadap peningkatan intensitas turbulensi aliran. Pengujian variasi jarak *bump* yang paling efisien untuk mengurangi titik *reattachment* pada pengujian yang dilakukan adalah pada jarak $s = 0.25h$, pada posisi $Z = 0.0508$ yang memberikan hasil jarak *reattachment* yang paling pendek yaitu 4.866, pengurangan sebesar lebih dari 10% seperti terlihat pada tabel 5.1

Tabel 5.1 Perbandingan jarak *reattachment* pada posisi $Z = 0.0508$

Variasi s/h	Y^+	panjang <i>reattachment</i>	Tanpa Bump
0.25	264.42	4.72	5.51
0.35	264.13	5.11	
0.40	254.06	5.51	

2. *Skin friction coefficient* yang didapatkan dari pengolahan numerik memberikan data tentang tegangan geser yang terjadi pada permukaan geometri. *Skin friction coefficient* pada bagian dinding juga sangat mempengaruhi jarak *reattachment*. Sehingga dari grafik pada pembahasan

Coefficient Friction dapat dilihat bahwa dengan menarik garis sejajar dengan nol pada sumbu y ordinat secara horizontal maka akan didapatkan jarak *reattachment* dari pengujian yang dilakukan.

3. Penambahan bodi pengganggu pada posisi *upstream channel* dapat mengurangi *pressure drop* yang terjadi dalam pemodelan *backward facing step*.
4. Daerah yang masih terkena efek separasi memberikan nilai *pressure drop* yang besar.
5. Tidak terdapat korelasi antara meningkatnya intensitas turbulensi dengan panjang *reattachment* yang terjadi.

5.2 Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian dan diharapkan dapat bermanfaat sebagai pertimbangan dalam penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut :

1. Penelitian ini belum dilakukan secara eksperiment sehingga cukup sulit untuk membandingkan hasil yang dapat divalidasi secara aktual. Hasil eksperiment sangat membantu untuk memvalidasi data yang didapatkan pada simulasi numerik.
2. Melakukan penelitian dengan variasi *reynolds number* dan variasi rasio ekspansi dengan penambahan *bump* agar didapatkan data yang lebih akurat dan dapat dipertimbangkan.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

1. Biswas, Breuer, and Durst. 2004. **Backward-Facing Step Flows for Various Expansion Ratios at Low and Moderate Reynolds Numbers**. Universitat Erlangen-Nurnberg Causerstr.
2. Driver, Seegmiller. 1985. **Features of Reattaching Turbulent Shear Layer in Divergent Channel Flow**. NASA Ames Research Center, Callifornia.
3. Eaton JK, Johnston JP (1980), “**Turbulent flow reattachment: an experimental study of the flow and structure behind a backwardfacing step**,” Rept MD-39, Dept of Mech Eng, Stanford University, Stanford, CA.
4. J.J. Kim. 2005. **Investigation of Separational Reattachment of The Instability of an Incompressible Separate Shear Layer**. PhD thesis, Stanford University.
5. Kuehn DM (1980), **Effects of adverse pressure-gradient on the incompressible re-attaching flow over a rearward-facing step**, AIAA J 18(3):343–344.
6. Lee, and Mateescu . 1998. **Experimental and Numerical Investigation of 2-D Backward Facing Step Flow**. McGill University.

7. Robert W. Fox, Alan T. McDonald, Philip J. Pritchard,. 2010. **Introduction to Fluid Mechanics**. Jhon Wiley & Sons, Inc.
8. Scarano F, Benocci C, Riethmuller ML (1999),**Pattern recognition analysis of the turbulent flow past a backward facing step**,Phys Fluids 11(12):3808–3818.
9. Sutardi, dan Widodo. 2008. **Studi Eksperimental dan Numerik Karakteristik Boundary Layer pada Permukaan Pelat Datar dengan Gangguan Sebuah Obstacle Berbentuk Rectangular**. Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di kota Jakarta, pada tanggal 29 Juni 1993, merupakan putra pertama. Pendidikan formal yang telah ditempuhnya, dimulai dari SDN BINTARA X Bekasi, SLTP Negeri 138 Jakarta dan SMA Negeri 12 Jakarta.

Setelah lulus SMA pada tahun 2010 penulis mengikuti seleksi penerimaan mahasiswa baru program Diploma III PNJ dan diterima sebagai mahasiswa di Jurusan D3 Teknik Mesin PNJ Jakarta. Setelah lulus penulis melanjutkan kuliah tahap Sarjana Jurusan Teknik Mesin Lintas Jalur Teknik Mesin ITS Surabaya. Penulis mengambil bidang keahlian Konversi Energi dan mengambil tugas akhir dibidang mekanika fluida.

Selain aktif mengikuti kegiatan perkuliahan. Penulis juga pernah mengikuti berbagai kegiatan didalam maupun diluar kampus. PT INTI GANDA PERDANA dan PT MITSUBISHI KRAMA YUDHA MOTOR merupakan tempat kerja praktek selama 3 bulan penulis pada tahun 2011 dan tahun 2012. Penulis aktif pada organisasi RESIMEN MAHASISWA di UI periode 2012-2013. Penulis dapat dihubungi di nomor telepon 082298058487 atau di alamat email ferdy.its@gmail.com